

窓に付着した害虫の線状電極アレーとその電界変化による除去手法の開発

橋本 貫生*, 橋本 洋一**, 吉田 孝博***,1

(2023年3月1日受付; 2023年5月17日受理)

Development of a Method for Removal of Insects on a Window Using Line Electrodes Array and its Electric Field Change

Kansei HASHIMOTO*, Yoichi HASHIMOTO** and Takahiro YOSHIDA***,1

(Received March 1, 2023; Accepted May 17, 2023)

Many pests that stay on windows and signboards cause a big problem. Seeing pests make people sick, and an increasing number of people have insect phobia. In addition, the pests on show windows and signboards reduce the value of advertised products. Therefore, removing insects from windows and surfaces is necessary to solve this problem. In this study, we proposed a new method to remove insects by changing the electric field generated by an array of electrodes at the window surface. The results of verification experiments using *Drosophila* showed that our proposed method achieved an insect removal rate of around 90% within 30 seconds at ± 3.0 kV applied voltage and vertical direction of the array. In addition, we achieved a removal rate of 100% in a shorter time at the applied voltage of 500 ms pulsewidth. It was also found that there was a relationship between the pulsewidth of the applied voltage, the electric field strength, the electric field direction, and the response of the insect removal effect.

1. はじめに

虫は様々な問題を引き起こす。一般的に注目される問題は、生態系の破壊や感染症の媒介、農作物被害などである。日本国内では、疾病を媒介する害虫や刺咬・吸血などで肉体的に実害を与える害虫を「媒介害虫」, 「有害害虫」と区分している。一方で、不快感や不潔感などの心理的・精神的な害を与える虫を「不快害虫」と区分している¹⁾。この不快害虫の生息域と、人間の生活領域が重なることで問題が生じている。

不快害虫が引き起こす問題のひとつに、虫が大量に飛来し、窓や看板などに張り付く問題がある。多くの虫が走光性を持つことは以前から知られている²⁾。走光性とは、広義には、光依存的な定位メカニズムにより光源に結果的に近づく行動、あるいは光源から結果的に離れる行動として使われることが多い³⁾。正の走光性を有する虫は、夜間の飲食店や服飾店、宿泊施設などの建物から発せられる光に誘引され、それらの窓や看板等に付着する⁴⁾。付着した虫が人の目に留まり、その不快感でその先に飾られた商品のイメージ、顧客の購買意欲、その店、場所、ブランドイメージなどの低下を招く恐れがある。また、現代になり、虫に対して恐怖感を抱く人も増加しており、虫への恐怖症は不安障害の中で有病率が比較的高い精神疾患のひとつで⁵⁻⁷⁾、WHOが行う世界精神保健調査の項目の内のひとつとなっている。これらの問題を解決するには、建造物の窓や看板、壁等の面に付着した不快害虫を除去する必要がある。本研究では特にニーズの高い適用先の一つである窓に付着した害虫の除去に焦点を当てた。

害虫防除技術は、農業被害や食品・精密機器などへの混入被害の問題があるため、社会的に重要なテーマであり、従来から様々な研究が行われている。それらの先行研究には、特殊な高分子材料を面に用いることで虫の付着防止設計を行った研究があるが⁸⁻¹⁰⁾、窓への適用は考慮されておらず、材料の透明性や耐摩耗性、耐汚性などについては検討されていない。また、虫の感受性の高いスペクトルの光

キーワード：害虫除去, 窓付着, 高電界, 電界変化, 電極アレー

* 東京理科大学大学院工学研究科電気工学専攻
(〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1)

Department of Electrical Engineering, Graduate School of Engineering, Tokyo University of Science, 6-3-1, Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, Japan

** 有限会社アスウェル

(〒731-5154 広島県広島市佐伯区薬師が丘 2-13-30)
Aswell, Ltd, 2-13-30, Yakushigaoka, Saeki-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima 731-5154, Japan

*** 東京理科大学工学部電気工学科

(〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1)
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Tokyo University of Science, 6-3-1, Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, Japan

¹ yoshida@ee.kagu.tus.ac.jp

DOI : <https://doi.org/10.34342/iesj.2023.47.4.163>

を遮光するフィルムで窓に虫を寄り付かせない、虫の走光性を利用したフィルムの研究¹¹⁾があるが、人間の可視光範囲と重複している飛来虫も存在する¹²⁾ため、この原理のみでの解決は困難である。また、殺虫成分をもつ薬剤¹³⁾の窓ガラスへの塗布や、蒸散剤として使用し空間全体の個体数を低減する対策も行われているが、これらの薬剤による手法は、時間経過によって効果が低下する欠点があり、環境や人体への影響に考慮し使用方法が制限されているため、安易に使用量は増やせない。さらに、虫の殺虫剤に対する耐性の向上¹⁴⁾も報告されているため、大量発生し群飛するユスリカ類¹⁵⁾などへの恒久的な効力は期待できない。

一方で、静電界中に曝露された虫の行動特性を調査した研究^{16,17)}では、電界による虫への力学的な作用が実験によって明らかになっている。特に、除去対象とする虫が本研究と類似するショウジョウバエを用いた文献¹⁶⁾の先行研究では、距離が55 mmの平行板電極間に17 kVの直流電圧を印加することで虫の除去を行っている。しかし、これらの研究結果に記されているレベルの電界を窓ガラスに形成するためには、窓ガラスの大きさに比例した、非常に高い電圧を窓枠に組み込んだ電極に印加する必要がある、危険を伴う。また、農場の通気性を確保しつつ飛来虫を捕虫することで防除を行うシステムを固定電界によって実現した静電場スクリーン¹⁸⁾があるが、同様のシステムを窓に実装した場合、虫は窓に張り付いてしまい、鱗粉等によって窓が汚れる可能性があり、窓への適用には不向きである。

そこで本研究では、窓表面の虫を効果的に除去するために、以下3点の工夫を施した除去手法を提案した。

- (1) 複数の線状の電極を窓表面に罫線のようにアレー状に配置し、その線状電極の偶数列と奇数列を別系統の回路とすることで、与える電位を変えられるようにした。
- (2) 隣接する線状電極間に電位差を与えることで、より低い印加電圧で窓表面に強い電界を発生させられるようにした。
- (3) 電界を時間的に変化させることで、窓表面の虫の張り付きを防止するとともに移動を促すようにした。

本論文では、この提案手法の詳細を述べるとともに、トリニドショウジョウバエを使用した検証実験による本手法の除去効果、ならびにパルス幅や印加電圧、電極方向に対する除去効果の傾向に関する調査結果についても述べる。

2. 線状電極アレーとその電界変化による除去手法 (提案手法)

2.1 構造

本節では、本提案手法の構造について述べる。図1に、窓ガラスに本方式を適用した場合の正面構成図を示す。図

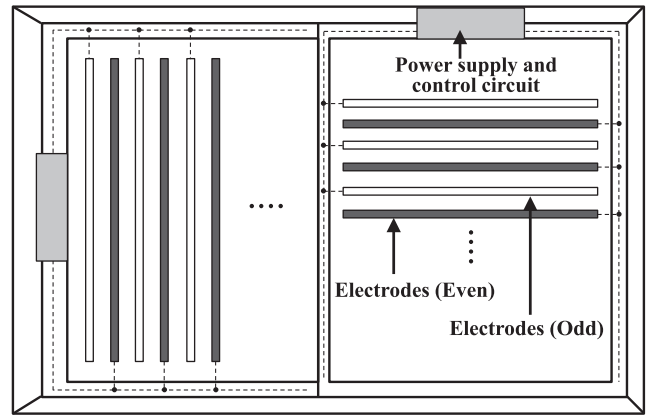


図1 提案する虫除去手法の正面構成図 (左側：電極の垂直配置例、右側：電極の水平配置例)

Fig.1 Frontal view of a diagram of the proposed method for removing insects. (Left side: Example of vertical placement of electrodes. Right side: Example of horizontal placement of electrodes.)

1に示すように、複数の線状電極を窓表面に罫線のようにアレー状に配置し、その線状電極の奇数列と偶数列で与える電位を変えられるように、回路を2系統とした上で電源・制御回路に接続する。図1中の窓左側には、電極を垂直に配置した例を、窓右側には電極を水平に配置した例を示す。電界は印加電圧に比例し、電極間の距離に反比例するため、本手法のように線状電極をアレー状に接近して配置して隣接する電極間に電位差を与えることで、窓の上下端や左右端に電極を配置する場合よりも大幅に低い印加電圧で窓表面における電界強度を確保することが可能となる。

また、本手法では前述のように電極を2系統とし、各系統へ印加する電圧の極性を時間的に変化させることで、窓表面の電界を変化させている。先行研究の調査結果¹⁸⁾より、強力な静電界を一定に発生し続けると、クーロン力によって虫の羽などが絶縁フィルム表面に張り付く状態となることで虫を追い払えず、虫の鱗粉により窓が汚れる問題が生ずる。さらに、複数種の虫に対応できるように様々な電界変化を与えるため、本手法では、電界の方向を時間的に変化させて虫を追い払うことで除去を行う方式とした。この2系統の電極に加える電圧シーケンスは、電源の仕様や対象とする環境に応じて、以下の電圧シーケンスを用意している。

- (1) 両極性電源の例 1…(系統1: +極性, 系統2: -極性)
 $\rightarrow(-, +) \rightarrow(+, -) \rightarrow(-, +) \dots$
- (2) 両極性電源の例 2…(0, 0) $\rightarrow(+, -) \rightarrow(0, 0) \rightarrow(-, +) \rightarrow(0, 0) \rightarrow(+, -) \dots$
- (3) 単極性電源の例 1…(+, 0) $\rightarrow(0, +) \rightarrow(+, 0) \rightarrow(0, +) \dots$
- (4) 単極性電源の例 2…(0, 0) $\rightarrow(+, 0) \rightarrow(0, 0) \rightarrow(0, +) \rightarrow(0, 0) \rightarrow(+, 0) \dots$

これらの電圧シーケンスは、両極性電源、単極性電源に

かかわらず、電界の向きは周期的に反転するために、虫に作用するクーロン力の向きを周期的に反転させることができると考えている。なお、両極性電源を使用した場合には、単極性の半分の印加電圧で同等の電界強度を実現でき、一方、単極性電源を使用する場合には印加電圧を高める必要があるが、電源コストは低減できると考えている。

ここで、単極性電源を用いる電圧シーケンス (3) や (4) において、電圧を印加しない系統を接地 (0 V) としたのは、両極性電源を用いる電圧シーケンス (1) や (2) と同様な向きの電界を隣接電極間に発生させるためである。また、電圧シーケンス (2) や (4) でシーケンスの途中で両系統の電極ともに接地 (0 V) とする状態を挟んだのは、2系統の電源の短絡防止や、極性反転時の過渡電流の低減を目的としている。

今回の試作では、線状電極には銅箔を用いたが、窓ガラスの透明性を確保するため、実用化するには酸化インジウムスズ (ITO: Indium Tin Oxide) などの透明導電膜の使用を想定している。

図2に、本方式を適用した場合の窓表面の断面構成図を示す。図2に示すように、薄い絶縁性のシート (絶縁フィルム) を線状電極と窓ガラスを覆うように設置する。この絶縁フィルムで電極を覆うことによって、電極の保護、絶縁破壊強度が高まることによる電極間のコロナ放電や火花放電の防止、フィルムの高抵抗による人の接触時の感電防止・低減、電極間よりも大きな体長の虫が付着した場合における短絡防止などを目的としている。なお、万が一短絡したとしても、上記の電圧シーケンスに含まれる周期的な極性反転や接地により虫は離脱することができるため、短絡の継続を防ぐことができると考えている。

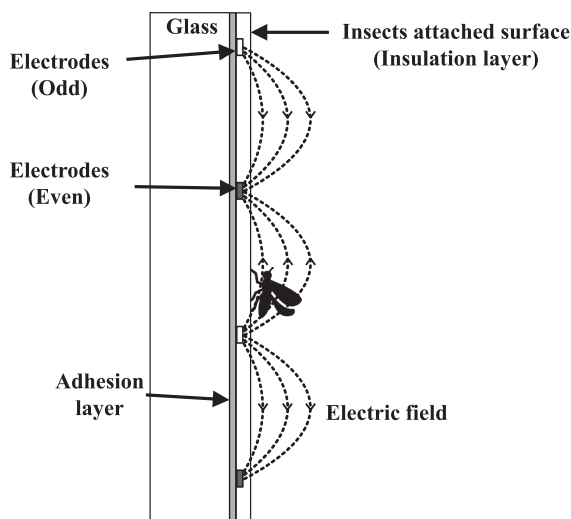


図2 虫除去手法の断面構成図 (水平電極配置)
Fig.2 Sectional view of a diagram of the proposed method for removing insects. (Horizontal placement of electrodes)

2.2 除去原理の仮説

本節では、提案手法の除去原理の仮説について述べる。窓表面に付着した虫を電界によって除去するには、虫に十分な電界を曝露する必要があるため、虫の付着面の表面から、虫が含まれる高さまでの空間に、強い電界を形成する必要がある。電極から離れるほど電界強度は弱くなるため、電極保護のために虫付着面に使用する絶縁物には、薄い絶縁フィルムを使用した。

虫を追い払う際に利用できる作用として、電界が虫の感覚器官や筋肉に直接的に作用する可能性も考えられるが、本研究の一連の実験における虫の挙動から、現段階では、虫に生ずるクーロン力による作用だと考えている。クーロン力は電荷、つまり帯電物体間に生ずる力であるため、クーロン力を虫に作用させるためには、虫が帯電している必要がある。虫は飛翔時に空気中のイオンや帯電粒子に晒されることで正極性または負極性に帯電する可能性がある。また、虫が帯電していなくとも、本手法で形成される電界によって、電極と逆極性の荷電粒子が電極付近に引き寄せられるため、既に表面に付着している虫、または付着面に接近している虫にこれらの荷電粒子が付着し、虫が電極とは逆極性に帯電する可能性も考えられる。

帯電した虫が表面に付着している時は、電極からのクーロン力を受けることとなる。虫の帯電と逆極性の電極付近にいる虫には引力が生じ、同極性の電極付近にいる虫は反発力を受ける。また、虫の羽は軽く、胴体よりも面積が広いため、クーロン力が最も作用するのは羽であると予測できる。このクーロン力を刺激として利用するため、電界の向きを変化させることで、虫の身体に対して引力と反発力を繰り返し与えることができる。そのようにして身体を揺らすように刺激を与えることで、虫をその場から追い払うことができると考えている。

3. 虫除去効果の検証方法及び条件

3.1 装置構成

2章で述べた提案手法の除去効果を検証するため、トリニドシヨウジョウバエを使用した検証実験のための装置を製作した。検証実験装置の断面図を図3に、虫の付着面と電極の正面図を図4に示す。本実験では、両極性の高電圧直流電源 (東和計測製, AKT-015K3PINS) と、高電圧リードリレーを制御するためのマイクロコントローラを用いた自作のコントローラを用いて、2系統で構成された電極に電圧を印加し、窓表面に電界を形成する。虫の付着面の素材は、厚さ 25 μm のポリエチレンテレフタレート (PET) 薄膜 (東レ製 ルミラー® フィルム T60透明) を使用した。電極について、実用時には透明電極などを使用することを

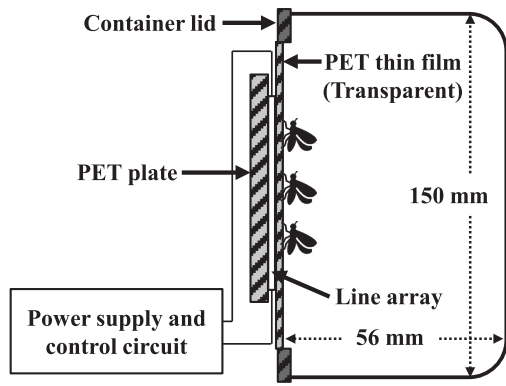


図3 実験装置の断面図
Fig.3 Sectional view of the experimental apparatus.

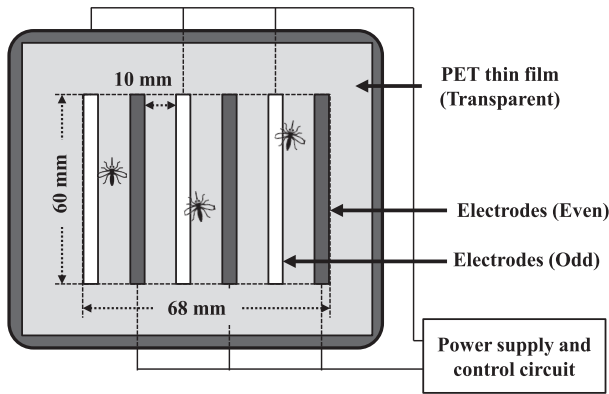


図4 虫の付着面と電極 (正面図)
Fig.4 Insects attached surface and electrodes. (Frontal view)

想定しているが、今回の検証実験においては、幅 3 mm、厚さ 50 μm の銅箔を代用した。1系統当たり 3本とし、2系統で合計 6本の銅箔を、10 mm の間隔で交互に配置した。実験中に虫が逃げないように実験は閉空間とし、その容器には縦横 150 mm、高さ 56 mm のガラス製容器を用い、その容器の上部にあるポリプロピレン製の蓋の中央をくり抜き、内側に PET 薄膜を両面テープで固定し、その容器を立てて使用した。図 3 のように容器の外側から各銅箔電極を設置した 3 mm 厚で 60 mm \times 200 mm の PET 板を押し付け、周囲をテープによって容器の蓋に固定した。

図 3 および図 4 中の電極と高電圧直流電源間の回路図を図 5 に示す。図 3 および図 4 中の電源・制御回路のうち、制御部はマイクロコントローラ (Arduino Mega2560) と、リードリレー (Sensata Technologies 製, DAT70515F) で構成している。リードリレーによって、正極性、負極性の高電圧直流電源、ならびにアースを選択的に電極の各系統へ接続する。人の接触時の感電防止・低減や実験上の安全対策のため、高電圧直流電源からの電流制限として、1 G Ω の高電圧抵抗 (Electrohm 製) を使用した。リードリレーの駆動回路はマイクロコントローラのデジタル I/O (Input/Output) を用いて、MOSFET (Goford Semiconductor 製、

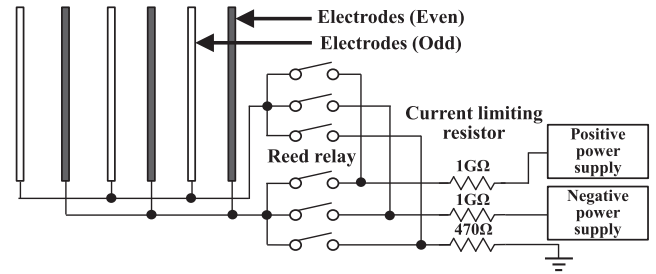


図5 電極と高電圧直流電源間の回路図
Fig.5 Circuit diagram between electrodes and power supply.

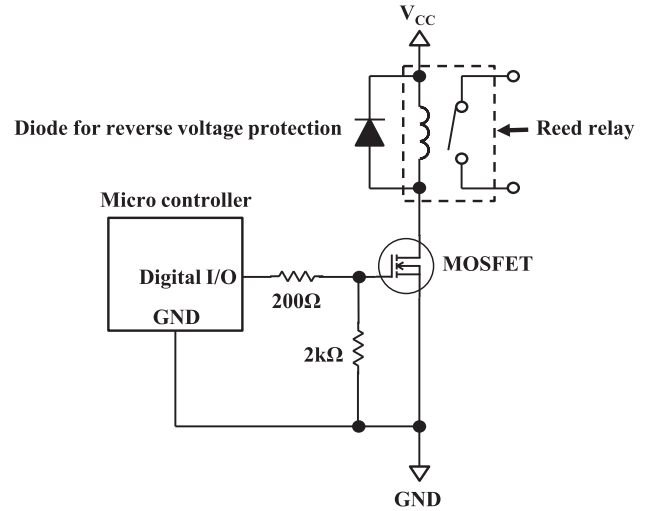


図6 リードリレー駆動回路
Fig.6 Circuit of reed relay driver.

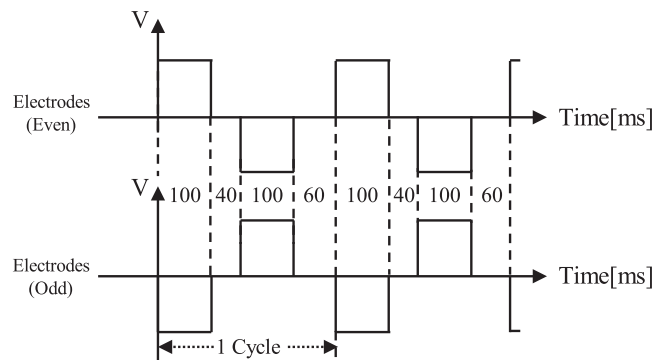


図7 各電極の電圧シーケンス (2)
Fig.7 Applied voltage sequence for each electrode (No.2).

G50N03J) の導通状態を制御し、リードリレー駆動用コイルに駆動電圧を印加することでリードリレーのスイッチングを行った。このリードリレー駆動回路図を図 6 に示す。今回の検証実験で用いた電圧印加シーケンスとしては、2.1 節で述べた (2) の、(系統 1:0 (アース), 系統 2:0 (アース)) \rightarrow (+, -) \rightarrow (0, 0) \rightarrow (-, +) \rightarrow (0, 0) \rightarrow (+, -) \dots のパターンを用いた。図 7 に示すように、(+, -) や (-, +) のパルス幅 (印加時間) は 100 ms もしくは 500 ms とし、アースへ接続する (0, 0) の時間は 40 ms, 60 ms とした。

リードリレーの駆動時に、電極をアースへ接続する (0, 0) を含むことで、接続の切り替え時に高電圧直流電源の正極性、負極性の出力間が短絡される危険性を排除した。

3.2 評価方法

本実験では、図3中のガラス製容器からなる閉空間の中に投入した約50匹の虫サンプルを電極表面のPET薄膜の表面に集め、虫がおおよそ静止してから30秒経過した後、時間的に変化する静電界を発生させた。PET薄膜表面の虫の様子はビデオカメラで動画記録し、記録映像から電界発生前後の各虫サンプルの行動を目視で追跡しカウントした。なお、虫サンプルは、動きが良好で損傷のないことを確認して使用している。

はじめに、提案手法の有効性を検証するために、電圧の印加後30秒の時点における電極範囲内の付着虫数を評価した。評価領域は、図4中の破線範囲で示した電極範囲内 (60 mm × 68 mm) とした。

加えて、本手法の印加電圧のパルス幅、電界強度、電極方向に対する除去効果の傾向に関する調査のために比較実験を行った。これらの評価では、電圧印加後の経過時間に対するPET薄膜面への虫の付着率で評価した。測定は記録動画によって行い、電圧印加後から85秒後まで、5秒毎に領域内の個体数を目視でカウントし記録した。

3.3 評価条件

検証実験は温度 18.1°C ~ 19.8°C、湿度 46%RH ~ 47%RH の建造物内で行い、評価サンプルには、評価を行いやすいように、羽は有するが遺伝子操作によって飛翔機能が無く、歩行のみが可能なトリニドショウジョウバエの個体を使用した。

表1に、各パラメータの除去効果への影響を調査するための比較実験条件を示す。表1中の各条件の計測は3回ずつ行った。なお、はじめに行った電圧印加後30秒時点の除去効果の評価実験には、表1中のPulsewidth Comparisonの条件で行った、パルス幅が100 msの計測3回、500 msの計測3回の計6回分の計測結果について集計した。

表1 各パラメータにおける比較実験条件
Table 1 Experimental conditions for comparison in each case.

Case	Pulsewidth [ms]	Applied voltage [kV]	Electrode direction
Pulsewidth Comparison	100	± 3.0	Vertical
	500		
Applied Voltage Comparison	100	± 2.5	Vertical
		± 3.0	
Electrode Direction Comparison	100	± 3.0	Vertical
			Horizontal

4. 検証結果

4.1 虫除去効果

図8に、本手法による電圧印加開始後30秒での虫除去率について、計測結果6回分とその平均値を示す。図8より、最低77%、最高100%、全体の平均で90%の虫除去効果を確認した。計測毎の実験開始時 $t=0$ における評価領域の付着虫数は約10匹から20匹程度であったが、1回目の計測開始時のみ6匹であった。付着虫に共通して見られた様子は、まず電圧印加前に落ちていて静止している個体が大半であり、数体は前脚同士をこすり合わせるような様子が見られた。電圧を印加した瞬間、ほぼすべての付着虫がPET薄膜面に身体が引き寄せられているかのように脚を広げ、姿勢を保とうとしたように見えた。続いて、小刻みに身体を震わせながら、その場から這うように移動し続け、最終的に電極範囲外へ移動した。電極範囲外へ移動した後は、すぐに安定して静止した個体もいれば、そのまま進み、容器上面に辿り着いて静止した個体も見られた。また、電極範囲内の虫の身体や羽が、電極の印加電圧の切り替え周期に合わせて電界方向に振動するように力が作用している様子も確認した。また、電圧印加時に電極に張り付き動けなくなるような個体はほとんど無く、ほぼ全ての個体が面上を歩行する様子を確認した。

この結果より、本研究で提案した虫除去手法は、付着虫に対して、電界変化によって静電界によるクーロン力を刺激として身体に影響を与えることができたと考えられる。そして、平均で90%以上の個体を電極範囲外まで忌避させることができたため、提案手法の有効性が確認できた。

4.2 各パラメータの除去効果への影響

本節では、表1に示した各条件におけるPET薄膜表面に残存する虫の残存率の時間変化を示すことで、本手法の印加電圧のパルス幅、印加電圧、電極方向に対する虫除去効果を述べる。

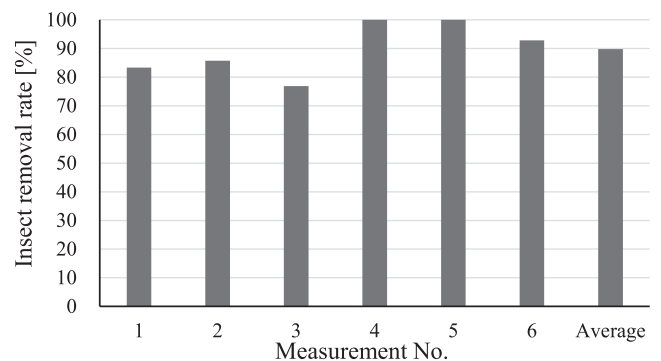


図8 電圧印加開始後30秒の虫除去率 (No. 1~3: パルス幅 100 ms, No. 4~6: パルス幅 500 ms)

Fig.8 Insect removal rate at 30 second after start of voltage application. (No. 1-3: 100 ms pulsewidth, No. 4-6: 500 ms pulsewidth)

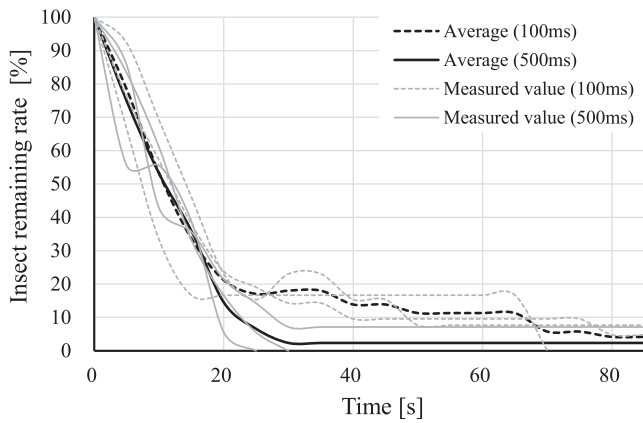


図9 パルス幅 100 ms / 500 ms における虫残存率の時間変化
Fig.9 Temporal change of insect remaining rate at 100 ms and 500 ms pulsewidth.

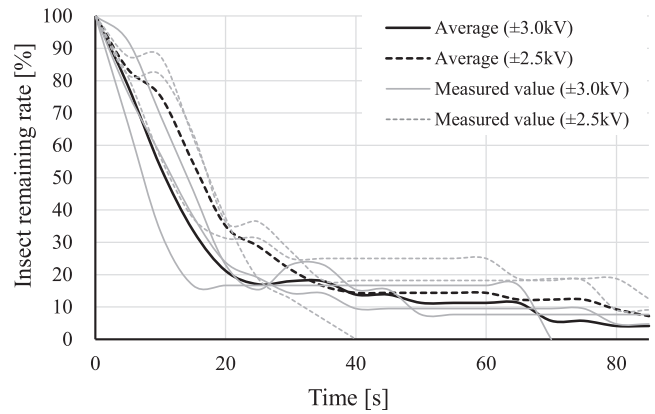


図10 ± 2.5 kV 及び ± 3.0 kV における虫残存率の時間変化
Fig.10 Temporal change of insect remaining rate at ± 2.5 kV and ± 3.0 kV.

4.2.1 パルス幅

図9に、パルス幅 100 ms 及び 500 ms における虫残存率の時間変化を、計測毎の波形、ならびに各パルス幅における平均波形で示す。図9より、全6回の計測結果から、全体の傾向として、電圧印加開始後から約20秒の間に約80%の虫が除去できていることが分かる。一方で、電圧印加開始後20秒からは、パルス幅が500 ms の場合に虫の除去効果に優位性があるが、パルス幅100 ms でも時間の経過と共に徐々に付着虫の除去を行えていることが分かる。この結果より、パルス幅の違いは、付着虫除去に要する時間に関係することが分かる。その理由としては、パルス幅が長いと虫を帯電させる時間が長くなり、次の極性反転時に虫に作用するクーロン力が大きくなることで、虫に対してより強い刺激を与えることができたためと考えている。

4.2.2 印加電圧

図10に印加電圧 ± 2.5 kV 及び ± 3.0 kV における虫残存率の時間変化を、計測毎の波形、ならびに各印加電圧における平均波形で示す。図10より、電圧印加開始から30秒までの虫残存率の平均値によると、印加電圧を増加させることで、時間的に早く付着虫の除去が行えることが分かる。この傾向は、各印加電圧の計測3回中、2回分の計測結果において見られた。一方、30秒以降の虫残存率はばらつきが大きく、印加電圧の差に明確な優位性は見られなかった。この結果より、印加電圧は、約80%の虫除去率までの応答性について関係があることが分かった。その理由として、印加電圧の違いは、PET 薄膜表面の電界強度の違いとなり、クーロン力に差を生じさせるため、虫に対する刺激にも差が生じたためと考えられる。

4.2.3 電極配置方向

図11に垂直及び水平の電極配置における虫残存率の時間変化を、計測毎の波形、ならびに各電極配置方向におけ

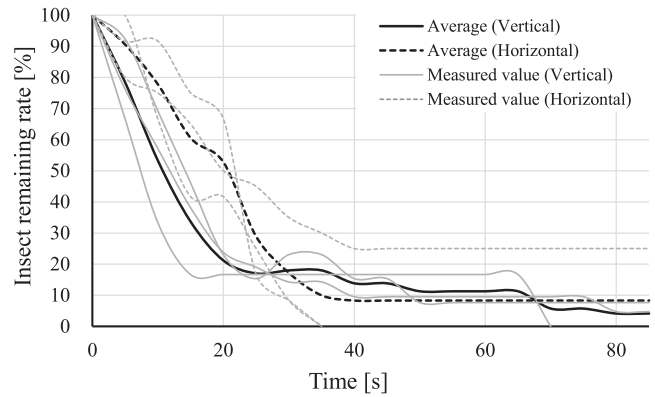


図11 垂直 / 水平電極配置における虫残存率の時間変化
Fig.11 Temporal change of insect remaining rate at vertical and horizontal electrode placement.

る平均波形で示す。図11より、電圧印加開始から30秒までの平均値と比較すると、垂直配置の方が水平配置よりも早く除去が行えており、垂直配置した電極は水平配置よりも、約80%の除去率までの応答性に優位であることが分かった。この理由は、今回使用した虫の行動特性にあると考えられる。今回使用したトリニドショウジョウバエは、鉛直に設置した面に付着した際、鉛直上向きに姿勢を保持しながらその方向に向かって進む習性が見られた。電界方向にクーロン力は働くため、電極が水平配置の場合、今回の虫の進行方向と同じ向きにクーロン力が働き、その場から動きにくくなっているために除去速度が遅くなったと考えられる。

5. まとめ

本研究では、窓ガラスなどの面に付着した害虫を除去するため、線状電極アレーとその電界変化による除去手法を新たに提案し、この提案手法の虫除去効果をトリニドショウジョウバエによる検証実験で確認した。

その結果、虫除去効果は、垂直方向に配置した電極に電圧を ± 3.0 kV印加する条件で、面に付着した虫のうち、平均で90%の虫を30秒以内に電極範囲内から除去できることを確認した。また、その電圧のパルス幅を500 msにすることで、より短い時間で100%の除去率まで到達できることがあった。また、各パラメータに対する虫除去効果の関係についても調査した結果、印加電圧のパルス幅、電界強度、電界方向と虫の除去効果の応答性に関係があることが分かった。

今後の課題としては、有効な電圧シーケンスの調査が挙げられる。今回の検証実験では、2.1節で述べた両極性電源を使用した電圧シーケンス(2)についてのみ行ったため、単極性電源を使用する電圧シーケンスを用いた場合などの検証とシーケンス間の効果の比較を行いたい。また、実環境での体長の大きな虫や異なる種類の虫に対する除去効果の調査が挙げられる。除去しづらい種類の虫に対しては、電極への印加電圧やそのパルス幅、さらには印加シーケンスを変化させることで、虫の帯電時間や曝露される電界の大きさを変え、より強い刺激を与えて除去を行うことで対応を目指す予定である。また、将来の実用化に向けて、電源回路や制御回路の簡略化も検討する予定である。

参考文献

- 橋本知幸：我が国における衛生害虫対策。ファルマシア, **57** [5] (2021) 359
- Lloyd M. Bertholf: The extent of the spectrum for *Drosophila* and the distribution of stimulative efficiency in it, p. 32-64, *Journal of Comparative Physiology A*, **18** [1] (1932)
- 弘中満太郎, 針山孝彦：昆虫が光に集まる多様なメカニズム。日本応用動物昆虫学会誌, **58** [2] (2014) 93
- 平尾素一：走光性昆虫による異物混入とその対策。環動昆, **13** [3] (2002) 163
- 川上憲人：精神疾患の有病率等に関する大規模疫学調査研究：世界精神保健日本調査セカンド，総合研究報告書 (2016)
- W. W. Eaton, O. J. Bienvenu and B. Miloyan: Specific phobias. *The Lancet Psychiatry*, **5** [8] (2018) 678
- J. Polák, S. Rádlová, M. Janovcová, J. Flegr, E. Landová and D. Frynta: Scary and nasty beasts: Self-reported fear and disgust of common phobic animals. *British Journal of Psychology*, **111** [2] (2020) 297
- J. B. Bergmann, D. Moatsou, V. A. Surapaneni, M. Thielen, T. Speck, B. D. Wilts and U. Steiner: Polymerization-induced wrinkled surfaces with controlled topography as slippery surfaces for colorado potato beetles. *Advanced Materials Interfaces*, **2000129**, **7** [12] (2020)
- E. V. Gorb, N. Hosoda, C. Miksch and S. N. Gorb: Slippery pores: anti-adhesive effect of nanoporous substrates on the beetle attachment system. *Journal of the royal society interface*, **7** [52] (2010) 1571
- G. Salerno, M. Rebora, A. Kovalev, E. Gorb and S. Gorb: Kaolin nano-powder effect on insect attachment ability. *Journal of Pest Science*, **93** [1] (2020) 315
- 大町俊司, 佐藤 浩, 石山良範, 佐藤純一郎, 石崎享子, 谷川 力, 川上裕司：紫外線カットフィルム (オプトロン) の飛期性昆虫に対する光誘引阻止効果。環動昆, **11** (2000) 9
- E. Eguchi, K. Watanabe, T. Hariyama and K. Yamamoto: A comparison of electrophysiologically determined spectral responses in 35 species of Lepidoptera. *Journal of Insect Physiology*, **28** [8] (1982) 675
- M. B. Isman: Botanical insecticides, deterrents, and repellents in modern agriculture and an increasingly regulated world. *Annu. Rev. Entomol*, **51** (2006) 45
- H. Ranson, B. Jensen, J. M. Vulule, X. Wang, J. Hemingway and F. H. Collins: Identification of a point mutation in the voltage-gated sodium channel gene of Kenyan *Anopheles gambiae* associated with resistance to DDT and pyrethroids. *Insect molecular biology*, **9** [5] (2000) 491
- A. Ali: Nuisance, economic impact and possibilities for control. *The Chironomidae*, Springer (1995) 339
- D. B. Watson, N. P. Sedcole, E. Chan, K. G. Smart and S. M. Patel: The movement of insects in an electric field. 10th International Conference on Electromagnetic Compatibility (1997) 54
- M. S. Al Ghamdi: The effect of static electric fields on *Drosophila* behaviour, Master of Philosophy Thesis University of Southampton (2012)
- K. Kakutani, Y. Matsuda, T. Nonomura and H. Toyoda: An Electrostatic Pest Exclusion Strategy for Greenhouse Tomato Cultivation. *Horticulturae*, **8** [6] (2022) 543