

静電場スクリーン技術の Q & A

静電場スクリーン研究会

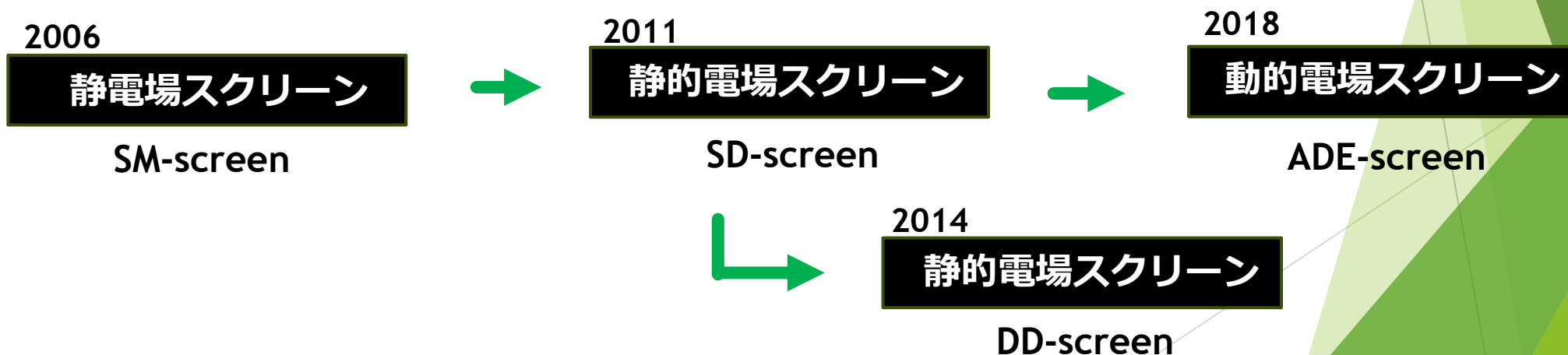
豊田 秀吉 (近畿大学 名誉教授)

松田 克礼 (近畿大学農学部 教授)

これまでの研究で色々なタイプの静電気スクリーンが開発されてきました。

開発の推移は？

- 1) 最初に静電場を利用した孢子捕捉装置を開発し、「静電場スクリーン」(SM-screen: Single-charged monopolar screen)と名付けました。
- 2) その後、静的電場を利用した2種類の害虫捕捉装置を考案し、「静的電場スクリーン」(SD-screen: Single-charged dipolar screen と DD-screen: Double charged dipolar screen)と名付けました。
- 3) 最後に、放電現象を利用した装置を開発し、「動的電場スクリーン」(ADE-screen: arc-discharge exposing screen)と名付けました。
- 4) 下図にこれらスクリーンの開発推移を示しました。



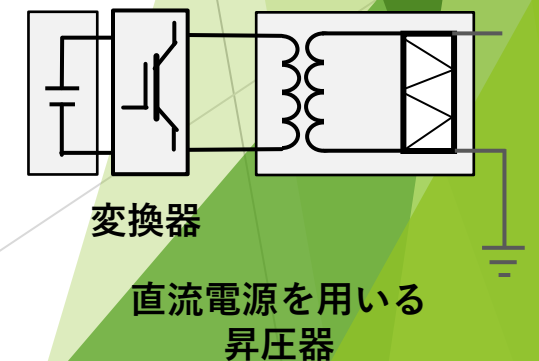
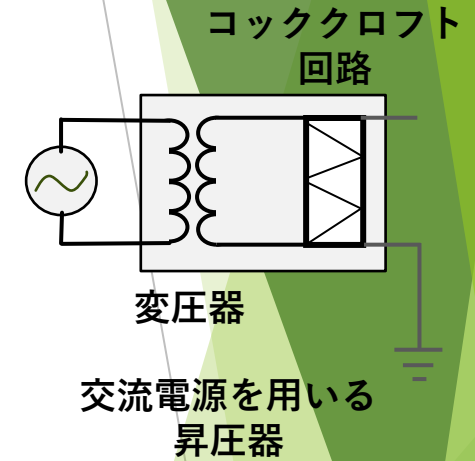
いずれのスクリーンも基本構造は昇圧器と帯電導体で成り立っています。

昇圧器の役割は？

- 1) 電圧を高め、その電圧を利用して電荷（自由電子）を動かす装置です。
- 2) アース線に接続して使用します。
- 3) 交流と直流の電源を利用できます。
- 4) 交流電源を用いるタイプでは、最初に変圧器（transformer）で一次昇圧し、その後、Cockcroft 回路で目的の電圧まで高めます（右上図）。
直流電源のタイプでは、まず変換器（Inverter）で直流を交流に変え、後は同じ方法で最終電圧にまで高めます（右下図）。
- 5) 最終段階のCockcroft 回路では、電荷を一方向にのみ移動させる（直流電流にする）仕組みになっています。

導体の帯電とは？

- 6) 導体とは、電荷が移動できる物質（物体）、すなわち、電気を通す物質の総称です。銅や鉄などの金属は電気をよく通す優れた導体です。
- 7) 導体を帯電させるためには、昇圧器に接続して電圧をかけます。



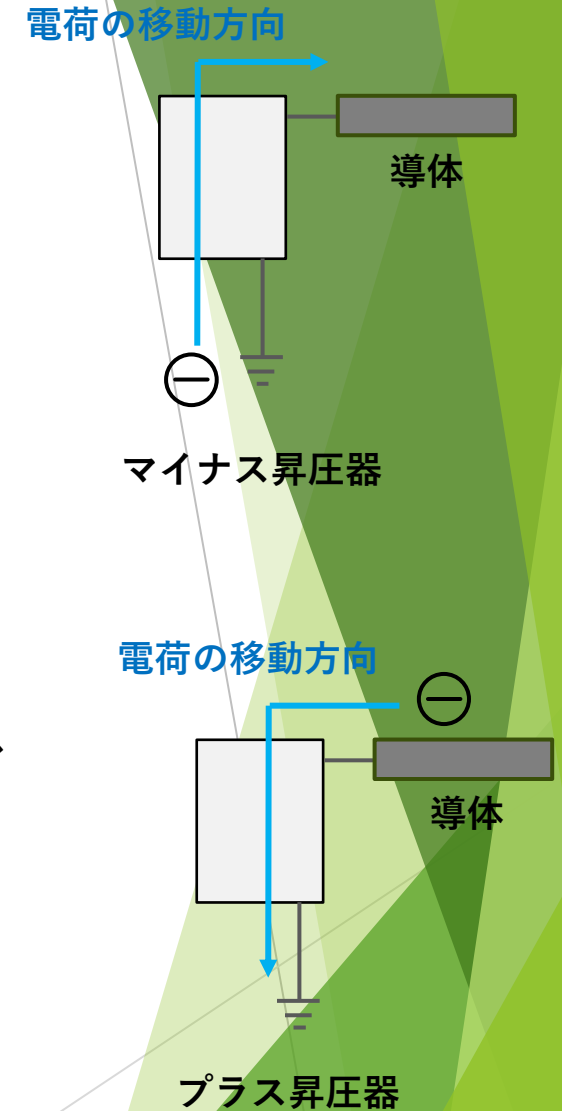
- 8) 昇圧器には2種類のタイプがあって、導体をマイナスに帯電するタイプとプラスに帯電するタイプに分かれます。両者の違いは、内部のコッククロフト回路が逆向き（すなわち、電荷の移動方向が逆向き）になっていることです。

導体の帯電とは？

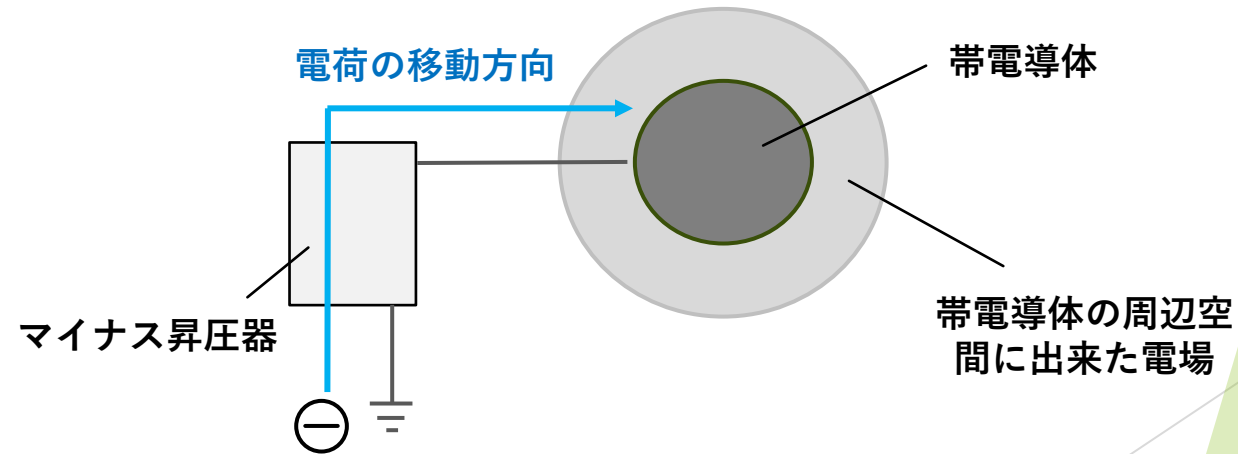
- 9) マイナスに印可する昇圧器（マイナス昇圧器）では、電荷の移動回路がアースから導体の方向にセットされています。電圧をかけると、昇圧器はアースから電荷を汲み上げて導体に供給します。その結果、導体はマイナスに帯電します（右上図）。
- 10) プラスに印加する昇圧器（プラス昇圧器）では電荷の移動方向が逆向きで、導体の自由電子が抜き取られてアースに流れます。自由電子を抜き取られた導体は電氣的にプラスの帯電状態になります（右下図）。

電場とは？

- 11) 電荷が存在すると、その周辺の空間に電場（electric field）が形成されます。電荷は周辺に存在する別の電荷に力（引力または斥力）を及ぼしますが、その力が及ぶ範囲を電場と呼びます。



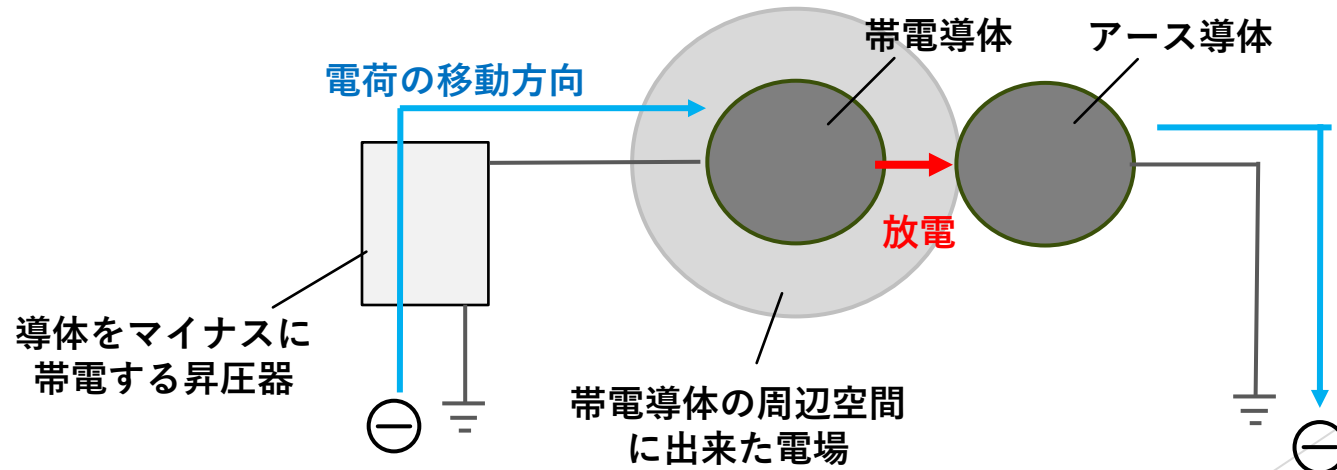
- 12) 導体を昇圧器に繋いで電圧をかけると、導体はマイナスまたはプラスに帯電します。この時の（マイナスやプラス）電荷は導体の表面に存在するので、結果的に、導体を取り囲む周辺空間に電場が出来ることになります。
- 13) 下の図では、マイナス昇圧器に導体の鉄製丸棒を繋いであります。図は丸棒の断面を示しています。
- 13) 電場の広がり方は、印加する電圧の大きさに比例します。電圧が大きくなれば、形成される電場も広くなります。
- 14) 電場では種々の興味ある現象が起こります。それらの現象を利用して考案した技術が静電場スクリーンとその関連装置に活かされています。



帯電導体の電荷は条件が揃えば放出されます。この現象を放電と言います。

放電が起きる条件は？

- 1) マイナス帯電した導体のケースで説明します。
- 2) このケースでは、マイナス電荷は導体表面に静止状態で存在しています。静止状態の電荷を静電荷と呼びます。
- 3) 静電荷が動くためには、受け手となる第2の導体が必要です。導体の帯電レベルを電位と呼びますが、両者に電位の差（電位差）がある場合に電荷移動が起こります。
- 4) 2つの導体が離れて存在する場合、電荷は帯電導体から空間を通過して第2導体に移ります。このような電荷移動が起こった場合に、帯電導体が「放電した」と言います（下図）。



電圧と放電の関係は？

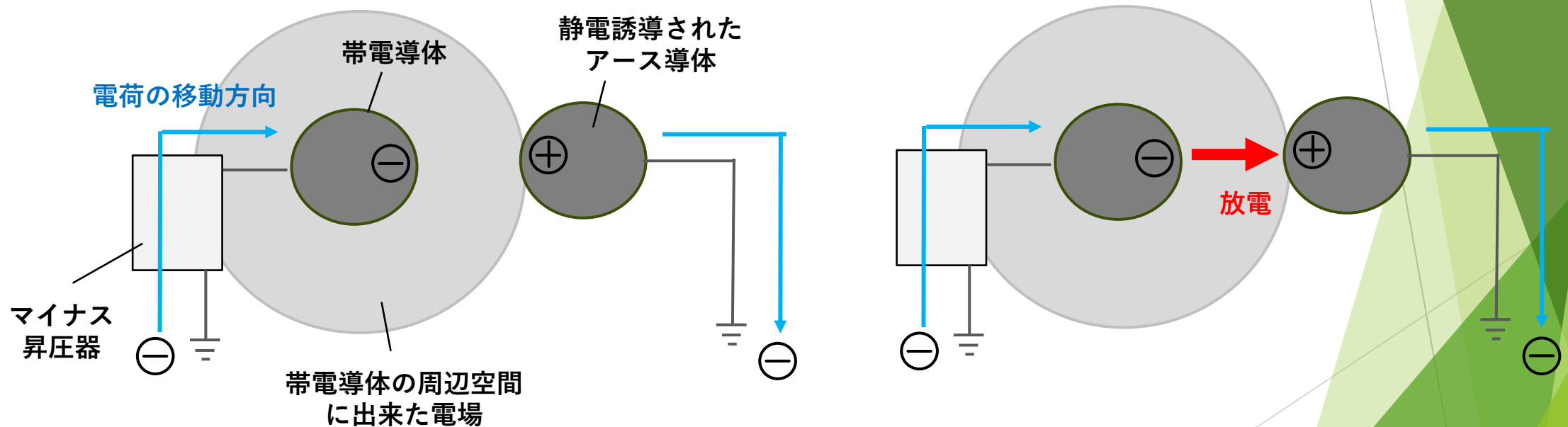
- 5) 上述の帯電導体は実は空気と言う「絶縁体」に包まれています。絶縁体とは電荷の移動を抑制する物質（物体）の総称です。ですから、第2導体までの距離は、空気絶縁層の厚さと言うことになります。
- 6) 帯電導体が放電する為には、空気絶縁層を通り抜けるだけの力を電荷に与える必要があります。
- 7) 電荷の（空気絶縁層）突破力は昇圧器で作る電圧の大きさに関係します。電圧が大きい程、導体を与える電荷量も増え、電荷量が増えると導体の電位も上昇します。電位が高い程、導体間の電位差が増し、その結果、電荷に与えられる運動エネルギーも増大します。

放電に関係する要因は？

- 8) 放電に関係する要因は以下の通りです。
 - 導体に印可する電圧
 - 導体間の距離
 - 第2導体が受け取れる電荷の量
- 9) 個々の導体が受け取れる電荷量にはそれぞれに制限があります。しかし、その導体をアース接続すれば、無制限に電荷を受け取れるように成ります。第2導体が受け取った電荷が全てアースに流れるからです。
- 10) 導体間の距離に関しては、第2導体が（帯電導体を作る）電場空間内に存在することが必須です（前頁の図を参照して下さい）。

第2導体が電荷を受け取る仕組みは？

- 11) 第2導体（アース導体）が帯電導体の電場に入ると、帯電導体のマイナス電荷から斥力を受けて、自身の自由電子がアースに押し出されます。この現象を「静電誘導」と呼びます。
- 12) 静電誘導の結果、第2導体はプラスに帯電し、帯電導体の対極（プラス極）として働きます。
- 13) プラス帯電した第2導体は、帯電導体のマイナス電荷を呼び込むこととなります。これら一連の結果として、帯電導体の放電が起こる訳です（下図）。



放電現象を利用したスクリーンが動的電場スクリーンです。

放電の種類は？

- 1) 放電には、コロナ放電とアーク放電の2種類があります。
- 2) 印加する電圧を一定にした場合、帯電導体とアース導体の距離（電極間距離）が放電の種類を決める要因になります。
- 3) 例えば、帯電導体を固定し、アース導体を徐々に近づける方法を用いた場合、ある距離になったときに放電が起こり始めます。
- 4) 最初は帯電導体の「コロナ放電」が起こります。
- 5) そのまま距離を近づけ続けてもしばらくはコロナ放電が続きますが、ある距離を過ぎた時点で間断的な「アーク放電」が起こります。
- 6) アーク放電はスパーク（火花）を伴います。
- 7) さらに距離を近づけると、連続的なアーク放電に変わります。

コロナ放電とは？

- 8) マイナス帯電を例にして、スクリーン技術に関する性質を紹介します。
- 9) コロナ放電が発生すると、帯電導体とアース導体の間の空間でマイナスイオンが生産されます。
- 10) 生産されるマイナスイオン量は、印加する電圧の大きさに比例して増加します。

- 11) 同時に、帯電導体からアース導体に向けて気流（イオン風）が発生します。このイオン風の強さも印可する電圧に比例します。
- 12) このような電場内にタバコの煙やウイルスを含む微小飛沫（捕捉標的）を入れると、それらにマイナスイオンが付着してマイナス帯電します。
- 13) マイナス帯電した標的はイオン風で流され、アース導体（プラス極）に捕捉されます。この原理を利用して考案されたのが「コロナ放電型捕捉装置」です。

アーク放電とは？

- 14) アース導体をさらに近づけると、アーク放電が起こります。この時、電荷は空気の絶縁性を打破して対極に移動します。この現象を空気抵抗の「絶縁崩壊（breakdown）」と言います。
- 15) 電荷は電極間を高速で移動するので、その途中で分子に衝突して二次電子やプラスイオンを産み出します。このような分子衝突の際に発生する光がスパークとして識別されます。
- 16) アーク放電が発生する電場に導体の標的（例えば、小型害虫や雑草苗）を入れると、標的は帯電導体からのスパーク照射を浮けることになります。
- 17) スパーク照射には強い衝撃力があるので、小型の害虫などはその力で死に至ります。
- 18) 一方、雑草の実生苗などが連続的なスパーク照射を受けると、放電による電荷移動、すなわち、植物体に流れる電流のジュール熱で死滅します。
- 19) このような原理を利用して開発された装置が、害虫や雑草を防除する為の「アーク放電照射装置」です。

絶縁体を用いれば、放電が起こらないスクリーンを作ることができます。

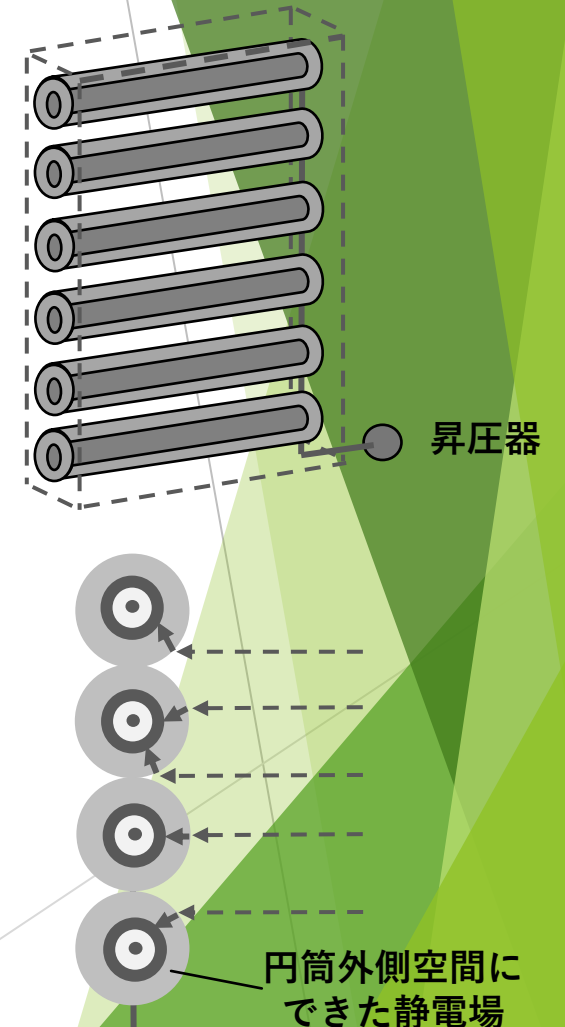
放電が起きないスクリーンとは？

- 1) 帯電導体を樹脂などで被覆すれば、その被覆材の絶縁性に応じて、帯電導体からの放電が起こりにくくなります。
- 2) これまでに用いた絶縁体にはアクリル樹脂、軟質ポリ塩化ビニル樹脂、ウレタン樹脂などがあります。
- 3) 実験的に絶縁被覆する場合は、上記の樹脂をチューブや円筒状に加工したもの（市販品）に鉄製あるいは銅製の丸棒を通します。
- 4) 帯電導体を絶縁被覆しても、アース導体を用いるケースでは、帯電導体からの放電を完全に止めることはできません。
- 5) 印可する電圧を上げていくか、電極間距離を近づけて行けば、電荷が被覆材を通り抜けて放電する場合があります。
- 6) 放電する場合には、最初にコロナ放電が起こり、続いてアーク放電が起こります。
- 7) 一方、アース導体を用いない電場には放電は起こりません。このような電場を特に「静電場」と呼びます。
- 8) この静電場を利用した装置が最初のスクリーンで、空中飛散する胞子を捕捉するために考案されました。その装置を「静電場スクリーン」と名付けました。

- 9) アース導体を用いる場合でも、電圧や電極間距離の条件をうまく設定すれば、放電を生じない電場を作れます。この状態の電場を「静的電場」と呼びます。この電場を利用して作製した装置が「静的電場スクリーン」です。小型の飛翔害虫を捕捉する為に作製しました。

静電場スクリーンとは？

- 10) 円筒状の亚克力樹脂に銅製丸棒を通してマイナス帯電します。このような帯電円筒を複数用意し、それらを水平かつ層状に並べたものが最初の静電場スクリーンです（右上図）。
- 11) 帯電導体を被覆する絶縁体は「誘電分極」という現象で分極帯電します。導体がマイナス帯電している場合、円筒の導体側の面がプラス、反対側（円筒の外側）の面がマイナスに帯電します。
- 12) マイナスに帯電した亚克力円筒もその周辺空間に電場（静電場）を形成します。分極帯電で生じた電荷は放電しません。
- 13) それぞれの円筒の静電場が互いに接するように配置したのが静電場スクリーンです（右下図）。このタイプのスクリーンを「SM-スクリーン」と呼んでいます。
- 14) 空中を浮遊する胞子がこの静電場内に入ると、マイナス帯電した亚克力円筒に捕捉されます。
- 15) 静電場スクリーンは静電場の「空間遮蔽バリアー」を形成しているので、風は通しても胞子の通過は許しません。

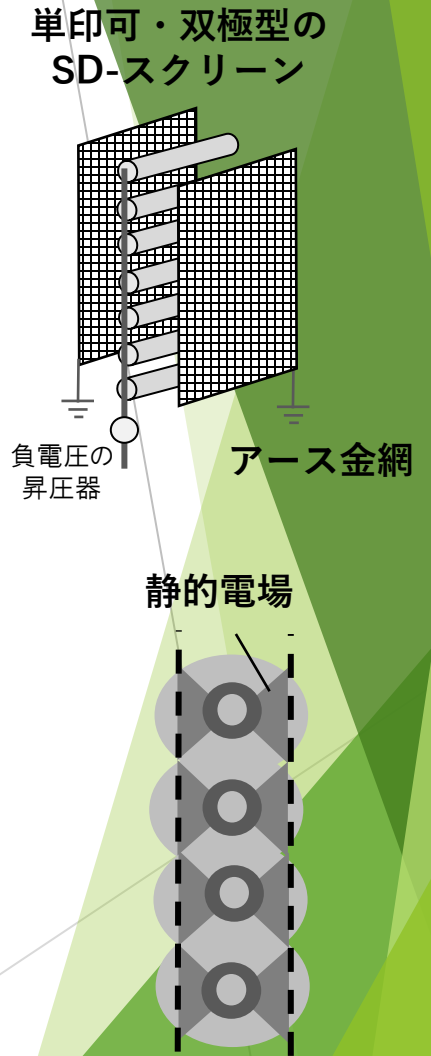


静的電場スクリーンとは？

- 16) 最初の「静的電場スクリーン」はSM-スクリーンの派生型として生まれました。
- 17) 軟質ポリ塩化ビニルチューブに鉄製丸棒を通してSM-スクリーンを作り、その両側にアースした金網を並置しました（右上図）。
- 18) 分極帯電した絶縁チューブがアース金網との間の空間に静的電場を作ります（右下図）。適切な電圧と電極間距離を設定すれば、帯電導体からの放電は起こりません。
- 19) このようにして生まれた装置が単印可・双極型の「SD-スクリーン」です。
- 20) 静的電場に侵入した小型の飛翔害虫は帯電した被覆導体に捕捉されます。

通常の防虫網で防げる害虫は問題ありません。しかし、防虫網の網目を通り抜ける小さな害虫が温室栽培植物に深刻な被害を引き起こします。このような害虫は殺虫剤に抵抗性を獲得していて、さらに、栽培植物に深刻な病気を引き起こすウイルスも伝搬します。このような害虫をSD-スクリーンで捕捉します

- 21) 温室の窓などに設置します。空気は出入りできますが、害虫は温室内に侵入できません。



SD-スクリーンは害虫を追払う能力をもつ？

- 22) SD-スクリーンの捕捉力はテスト害虫を静的電場（絶縁被覆した帯電導体とアース金網の間の空間）に吹き入れて調べます。
- 23) しかし、SD-スクリーンを温室の窓に設置し、そこに飛来した害虫の挙動を観察すると、次のことが分かりました。

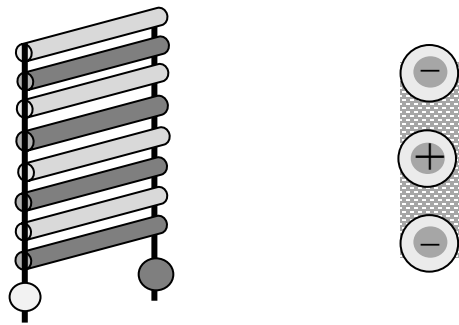
飛来した昆虫はまず金網に止まり、中に立ち入る前に触覚などを電場内に挿入します。この時、触覚が内部に引っ張られる様子が見て取れます。どの昆虫もこの「引っ張られる力」を嫌って、中に入らずに退散してしまいます。害虫が電場内の力を認識し、それを忌避したことは明白でした。

- 25) この現象をスクリーンの側からみると、スクリーンの「引張る力」が害虫を追い払ったと言えます。このような観察の結果から、SD-スクリーンは「害虫を追払う為のスクリーン」として広く使われるようになりました。

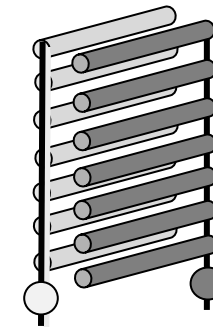
別のタイプの静的電場スクリーンもある？

- 26) 別のタイプの静的電場スクリーンは、2台もしくは3台の（軟質ポリ塩化ビニルチューブで作製した）SM-スクリーンを重ね合わせて作ったものです。
- 27) それぞれのSM-スクリーンを重ね合わせた時に、互いの絶縁被覆導体が段違いに成るように設計してあります。

- 28) それぞれのSM-スクリーンはプラス昇圧器とマイナス昇圧器に交互に繋がります。
- 29) この方法によって両印加・双極型の装置を作製し、2層型（右上図）および3層型のDD-スクリーン（右下図）と名付けました。
- 30) DD-スクリーンは、小型の飛翔害虫だけでなく、空中飛散する孢子や花粉に対しても強い捕捉力を示します。
- 31) 絶縁被覆導体を段違いに配列するタイプに加え、それらを交互には配列したタイプも作製し、1層交互配列型DD-スクリーンと名付けました（下図）。



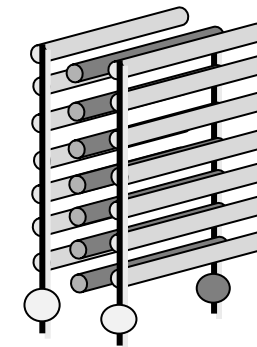
1層交互配列型のDD-スクリーン



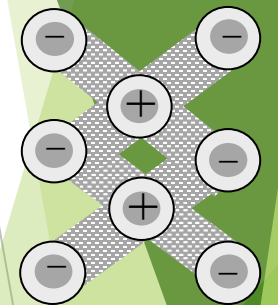
2層段違い配列型のDD-スクリーン



静的電場



3層段違い配列型のDD-スクリーン



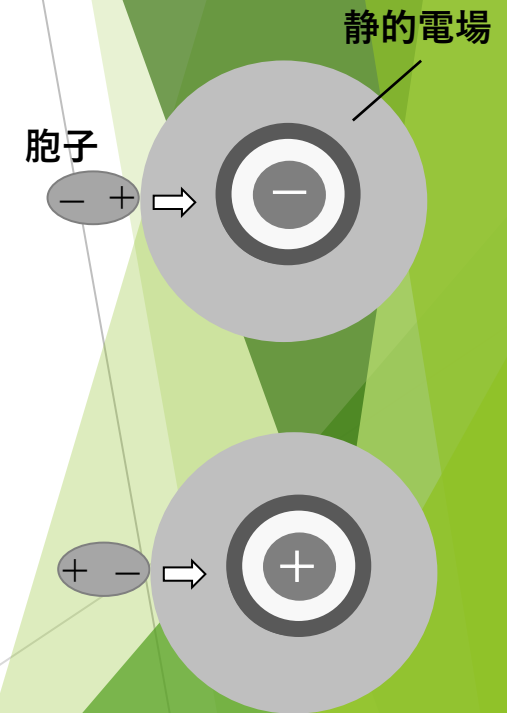
胞子や花粉と昆虫は別の静電気メカニズムで捕捉されます。

胞子や花粉の捕捉メカニズムは？

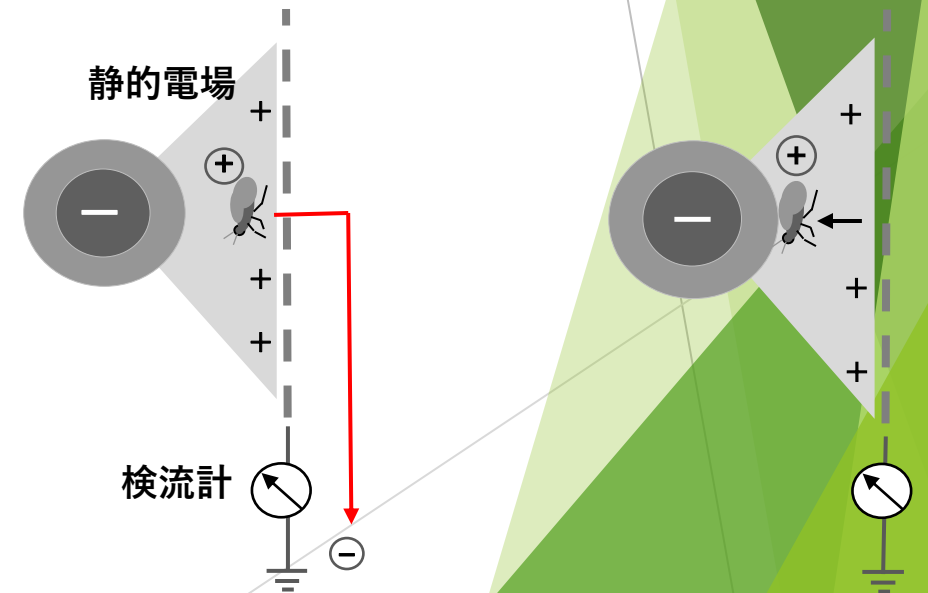
- 1) 胞子や花粉などが電場に入ると帯電体に引き付けられて捕捉されます。
- 2) そのメカニズムは「誘電泳動」(dielectrophoresis) という現象によります。
- 3) 電場に入った胞子などは、例えば、マイナス帯電体のケースであれば、胞子の帯電体側がプラス、その反対側がマイナスに分極します(右上図)。プラス帯電体であっても理屈は全く同じです(右下図)。
- 4) 電場内では、帯電体に近い場所ほど電場強度(その地点での力の強さ)も大きくなっています。その為、電場内の標的は引き付ける力が強い方向に移動し、最後は帯電体に捕捉されます。電場の強度勾配に従って移動する訳です。
- 5) このメカニズムでは、標的が電荷を帯びていなくとも捕捉できます。

害虫の捕捉メカニズムは？

- 6) 通常の防虫網(網の目合が1~1.5 mm程度)を通り抜ける小型の飛翔害虫と言えども、胞子や花粉のサイズに比べれば莫大な大きさです。また、害虫には運動能力もあるので、捕捉する力が弱ければ逃げてしまいます。
- 7) 実際、誘電泳動に基づく力では害虫を完全に捕捉することはできません。



- 8) 害虫を捕捉する為には静的電場を使用する必要があります。
- 9) マイナス帯電体（SD-スクリーン）が作る静的電場を用い、害虫捕捉の原理を説明します。
- 10) 静的電場の特徴は、帯電体のマイナス電荷が電場の中のマイナス電荷を斥力でアースに押し出してしまうことです。
- 11) 下の図では、静的電場に昆虫が入った場合を説明しています。
- 12) この場合、昆虫は体内のマイナス電荷（自由電子）を押し出され、プラスに帯電します（下図左）。
- 13) 昆虫からの電荷の流出は、アース線に取り付けてある微量電流計（検流計）で一過的な電流として検出できます。
- 14) プラス帯電した昆虫は、マイナス極の帯電導体に引力で引きつけられます（下図右）。
- 15) この力は非常に強いので、帯電体に捕捉された昆虫はいくらもがいても逃れることはできません。
- 16) 大きな昆虫でも捕捉できます。体が大きくなる程、奪われる電荷も多くなるので、結果的に生まれる静電気引力も強くなる訳です。
- 17) 一般に、この方法の捕捉対象は通常の防虫網を通り抜けてしまう小型の害虫です。このような害虫はすべて静的電場で捕捉することが出来ます。



参考文献

1. 豊田秀吉、松田克礼. 2014. 静電場スクリーンによる農作物防除システム：空間遮蔽のための静電気工学入門. 農文協, 東京, pp. 247.
2. 豊田秀吉、松田克礼、野々村照雄、角谷晃司. 2015. 目で見える静電場スクリーンの構造と機能 (CD教本). 静電場スクリーン研究会出版部. 奈良.
3. 豊田秀吉、草刈眞一、松田克礼、角谷晃司、許玲、野々村照雄、瀧川義浩. 2019. 図解 静電場スクリーン その構造と機能. 静電場スクリーン研究会出版部. 奈良, pp. 109.
4. 松田克礼、野々村照雄、本多健一郎、草刈眞一、井村岳男、金原淳司、豊田秀吉. 2007. 静電場スクリーンを利用した病害虫捕捉技術の開発と施設栽培への応用. 農業および園芸, 82:1083-1088.
5. 松田克礼、野々村照雄、本多健一郎、草刈眞一、井村岳男、金原淳司、豊田秀吉. 2007. 静電場を利用した画期的病害虫侵入防止技術の開発. 施設と園芸, 136:38-40.
6. 松田克礼、野々村照雄、本多健一郎、草刈眞一、井村岳男、金原淳司、豊田秀吉. 2007. 静電場を利用した病害虫の捕捉と施設栽培への応用. 農業電化, 60:6-9.
7. 野々村照雄、松田克礼、豊田秀吉、本多健一郎、草刈眞一、井村岳男、金原淳司. 2007. 静電場スクリーンの開発と栽培施設への応用. ビニールと農園芸, 49:24-28.

8. 野々村照雄、松田克礼、豊田秀吉、本多健一郎、草刈眞一、井村岳男、金原淳司. 2007. 誘電分極体スクリーンによる病害虫遮蔽システム: 屋内への花粉侵入と栽培施設への病害虫侵入を遮蔽する新しい環境保全システム. クリーンテクノロジー, 17: 42-43.
9. 野々村照雄、松田克礼、金原淳司、草刈眞一、本多健一郎、井村岳男、豊田秀吉. 2007. 静電場で病害虫のハウス侵入をシャットアウト. ニューカントリー, 54:32-33.
10. 豊田秀吉. 2007. 静電気利用の防虫バリアー: 誘電分極体スクリーン. 農業総覧(追録13), 998:2-5.
11. 松田克礼、野々村照雄、金原淳司、草刈眞一、豊田秀吉. 2008. 静電場スクリーンで病害虫をシャットアウト. ハイドロポニックス, 22:21-22.
12. 松田克礼、野々村照雄、豊田秀吉、金原淳司、草刈眞一. 2008. 静電場スクリーンの開発と実用化. 植物防疫, 62:545-548.
13. 豊田秀吉、松田克礼、野々村照雄、金原淳司、草刈眞一. 2008. 静電気で病害虫を絶つー静電場スクリーンの開発と実用化. 農林水産技術研究ジャーナル, 31:37-40.