

粉粒体用静電チャックの基礎特性と人工播種への応用

大森 拓磨, 杉本 俊之

(2018年1月30日受付; 2018年5月15日受理)

Basic Characteristics of an Electrostatic Chuck for Granular Materials and Application to Artificial Seed Planting

Takuma OMORI and Toshiyuki SUGIMOTO

(Received January 30, 2018; Accepted May 15, 2018)

For manipulating granular materials or particles, several methods are developed using mechanical, electrical, and optical ways. Although these methods can manipulate only one particle called one by one method, it is difficult to manipulate fixed amount of particles at once. We developed chucking and releasing system for granular materials using the principle of an electrostatic chucking. The particles are chucked by induction charging, and released by charge elimination along with vibration. The chucking model estimating the number of particles as a function of the electrode diameter, applied voltage, and particle diameter was developed and confirmed by experimental results. By controlling the area of the induction charging electrode, or the distance between electrode and particles, it was possible to control the amount of particles to be chucked. Also, only one particle can be chucked by selecting electrode diameter and applied voltage. It was found that the electrostatic chuck was significantly effective for manipulating single or plural particles.

1. はじめに

粉粒体を搬送する装置として、振動フィーダー、ロータリーフィーダーあるいはテーブルフィーダーなどの方法が提案されており、微量の定量供給も可能になっている¹⁾。しかし、これらの供給方法は機械的な力で粉粒体を押し出す構造になっているため、粉粒体の流動性の違いによって供給量が大きく変化したり、機械的な力で壊れやすい粉粒体の供給が困難であったりする問題がある。また、ごく微量の粉粒体を取り扱うのは困難であるため、このような場合は1粒1粒を掴んで離すマニピュレーション方法を用いることになる。例えば、比較的大きなものはピンセットや2本針等があり、真空チャック²⁾やレーザーを用いる方法³⁾等、さらに、静電気力を用いる方法も提案されている⁴⁻⁶⁾。これらの粉粒体のマニピュレーション方法は、1度に粉粒体1粒のみをマニピュレーションする方法 (One-by-one-method) であり、複数の粉粒体を1度に取り扱う方法 (Many-at-once-method) の研究はあまり進められていない。

本研究では単極性静電チャックの原理を応用し、一度に複数粒のマニピュレーションを行う装置の開発を行った。これは、絶縁被膜した電極の表面に粉粒体を誘導帯電させて吸着する機構と、吸着した粉粒体を除電して脱着させる機構を分けたことを特徴とする装置である。本論文では、その基礎特性を調べ、動作原理を明らかにした。また、その応用例の一つとして人工播種について検討した結果について報告する。

2. 粉粒体用静電チャックの原理

2.1 装置の概要

図1に示すように、試作した粉粒体用静電吸着・脱着装置は静電吸着装置⁷⁾、除電装置⁸⁾および振動子からなる。(a)のように粉粒体サーバの中から必要な量の粉粒体を吸着し、必要な場所へ移動させた後、(b)のように除電装置と振動子を用いて脱着する機構になっている。静電吸着装置は図2に示すように絶縁被覆した直流高電圧電極(以下、吸着電極)から成り、負極性の電圧を印加し、粉粒体に正の電荷を誘導させて絶縁層の表面へと吸着させる。電極の端効果をなくすため、高電圧電極を囲むように接地電極を配置している。脱着する際は、吸着電極への印加電圧をゼロにした状態で図3に示す除電装置を動作させる。

正負の針電極に直流高電圧を印加すると針先から正負のコロナイオンが放出され、粉粒体の持つ正の電荷を除去するとともに、絶縁層表面の残留電荷を除去する。除電操作のみで粒子が脱着しない場合には振動子による振

キーワード: 粉粒体, 静電チャック, 誘導帯電, 除電装置, 人工播種

* 山形大学大学院 理工学研究科

(〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16)

Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University, 4-3-16 Jonan, Yonezawa-shi, Yamagata, 992-8510, Japan

[†] toshi@yz.yamagata-u.ac.jp

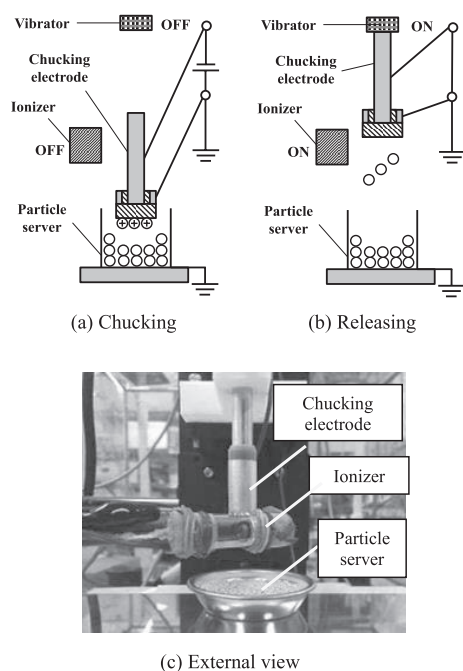


図1 粉粒体用静電チャック
Fig.1 Electrostatic chuck for granular materials.

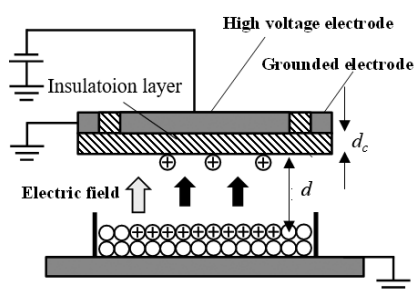


図2 吸着原理図
Fig.2 Chucking principle.

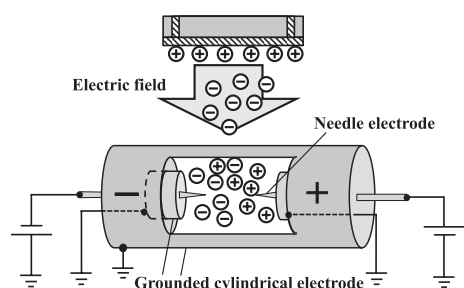


図3 試作した除電装置
Fig.3 Field driven ionizer used in this study.

動を加える。

吸着電極は電動ステージ（シグマ光機，SGSP33-100）によって高さを調節することができる。吸着電の先端を粉粒体サーバの中に埋めて（接触させて）吸着させる方法（接触吸着）とサーバ内の粉粒体からは距離をあけて静電気力で飛昇させて吸着させる方法（飛昇吸着）について検討した。接触吸着は粉粒体に接触させ非常に強い

静電気力で吸着させることができるため、自重の大きいものや硬度が高いものをマニピュレーションするのに向いていると考えられる。飛昇吸着は粒径が小さく、自重の小さいものが向いており、特に接触により壊れやすいような顆粒等をマニピュレーションするのに向いている。

2.2 対象とする粒子

本方式では、静電気力が、粒子の自重による重力などの下向きの力よりも大きくなると吸着させることができる。粒径が小さいもの（十数 μm 以下）では粒子間の吸着や空気中の水分による付着力が支配的となるため、静電気力のみでは吸着できない可能性がある。一方、粒径が大きいもの（数 mm 以上）では静電気力よりも重力が支配的となり吸着できない。本方式では、誘導帯電による飛昇吸着が可能とされている粒径範囲（十数 μm ～数 mm ）を対象とした⁹⁻¹¹⁾。また、粒子が導電性を持たなければ誘導帯電しないため、絶縁体粒子は対象外とした。

本論文では、球状粒子を対象とした接触吸着と飛昇吸着に対する吸着モデルを構築し、理論的な吸着数を導出した後、大きさの揃った2種類の導電性粒子（直径 1 mm と 0.3 mm ）を用いた吸着実験によりモデルの妥当性を確認し、吸着数を制御するための知見を得た。次に、吸着電極の面積等によって吸着数を1個から多数個まで制御する方法について実証試験を行った。最後に、本方式による産業応用の一つと考えられる人工播種について、実際の種を用いて吸着・脱着量を制御するための実証試験を行った。これらの実験に使用した粒子および種は、いずれも上記の粒径範囲内にある。

2.3 吸着モデル

本方式による吸着特性を理解しやすくすることを目的として、簡単な吸着モデルを構築した。

粒子に加わる電界は式(1)で表すことができる。

$$E_0 = \frac{V_0}{d + \frac{1}{\epsilon_r} d_c} \quad (1)$$

ただし、 V_0 [V] は高電圧電極への印加電圧、 d [m] は絶縁層の表面から粒子の中心までの距離、 ϵ_r は絶縁層の比誘電率であり、 d_c [m] は絶縁層の厚さである。（図2参照）また、電界 E_0 [V/m] によって直径 D_p [m] の球状粒子に誘導されるときの誘導帯電荷は式(2)で与えられる⁸⁾。

$$Q = \frac{1}{6} \epsilon_0 D_p^2 \pi^3 E_0 \quad (2)$$

したがって、粒子に加わる静電気力は式(3)となる。

$$F = QE_0 = \frac{\epsilon_0 D_p^2 \pi^3 V_0^2}{6 \left(d + \frac{1}{\epsilon_r} d_c \right)^2} \quad (3)$$

誘導帯電による静電気力の他にも接触帯電によって発生する静電気力やファンデルワールス力等もあるが、小さいものとして無視すると、粒子が持ち上がる最小の電界は式(4)で表すことができる。

$$E_{min} = \sqrt{\frac{gD_p\rho}{\epsilon_0\pi^2}} \quad (4)$$

ただし、 ρ [g/m³] は粒子の密度である。 E_{min} は粒子の直径 D_p と密度 ρ の積の関数となり、この値が大きいほど大きな電界を印加する必要がある。

2.3.1 接触吸着

接触吸着によって吸着される粒子の最大個数について考える。直径 D_e [mm] の円柱状吸着電極に粒径 D_p [mm] の球状粒子を複数個吸着させる場合、粒子が最大数吸着された状態を下からみると直径 $D_e + D_p$ の円の中に粒子が存在することになるので、粒子が存在する部分の投影面積 S_e [mm²] は式(5)となる。

$$S_e = k_r \pi \left(\frac{D_p + D_e}{2} \right)^2 \quad (5)$$

ただし、 k_r は粒子間にできる不可避な隙間を考慮するための1より小さい定数である。粒子径が小さいほど隙間なく粒子が詰まるので1に近くなる。最大数吸着された粒子の個数を N_c 個とすると、 S_e は次式でも表される。

$$S_e = N_c \pi \left(\frac{D_p}{2} \right)^2 \quad (6)$$

よって、 N_c は式(7)で表すことができる。

$$N_c = k_r \left(1 + \frac{D_e}{D_p} \right)^2 \quad (7)$$

式(7)より、吸着電極の直径 D_e によって最大吸着数 N_c を調節できることが予想される。また、粒子の大きさ D_p が分かれば、吸着個数をある程度見積もることができる。

2.3.2 飛昇吸着

d の大きさを粒子の半径よりも大きくなるように吸着電極を設置すると、静電気力が重力よりも大きい条件では粒子が上向きに飛昇して吸着する。このとき、印加電圧と逆極性の電荷が絶縁層表面に吸着されることになるため、まだ吸着していないサーバ内の粒子に加わる電界 E' [m/s] は式(8)のように低下してしまう。

$$E' = \frac{V_0 - \frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0} d_c \sigma_s}{d + \frac{1}{\epsilon_r} d_c} \quad (8)$$

ここで、 σ_s は絶縁層に付着した粒子による表面電荷密度である。帯電した粒子の付着による電界の低減効果で後から来る粉粒体の飛昇が止まる際は E' が式(4)の E_{min} になる。一方、接触吸着では式(8)の電界が0になるよう

に誘導電荷 σ_{sc} が配分されると考えるので、最大飛昇吸着量 N_F は N_c を用いて次式で与えられる。

$$N_F = \frac{\sigma_{sf}}{\sigma_{sc}} N_c = \left(1 - \frac{E_{min}}{E_0} \right) N_c \quad (9)$$

N_c は電極径と粒子の径で決まり、 E_{min} は粒子の径と密度で決まるため、飛昇吸着では E_0 によって吸着量 N_F を調整することもできると予想される。

3. 実験結果および考察

3.1 吸着・脱着時の挙動の例

直径 8 mm の円柱状電極の底面に厚さ 165 μ m のテフロンテープを貼り付けて吸着電極を構成した。この吸着電極に -2.0 kV を印加し、粒子として粒径 1.0 ± 0.02 mm の金属球（千住金属工業株式会社、エコソルダーボール M705 1.0 ϕ 、1粒の質量約 3.7 mg）を接触吸着させた際の吸着面の様子を図4に示す。(a) は吸着時であり、絶縁層に粒子が均一に吸着されていることが確認できる。(b) は脱着時であり、除電および振動によって完全に脱着させることができている。繰り返して吸着させたときの電極上の粒子の吸着量（個数）を図5に示す。10回の試行ではほぼ同数の粒子が吸着され、平均値が 53.6 個、標準偏差は 3.87 であった。誘導帯電を用いる吸着の原理上、粒子が2重に重なって吸着されることはなく1層のみで吸着されるため、ほぼ同数の粒子が吸着されるものと考えられる。ほぼ同数の中での吸着個数にばらつきがみられるのは、使用した粉粒体サーバ内での上層部での粒子の配列の影響で粒子間の隙間にばらつきが生じたためと考えられる。また、図5では脱着後に残った粒子の個数は

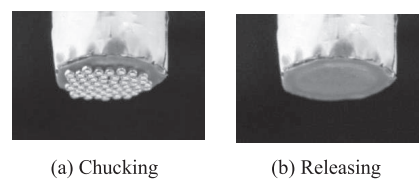


図4 吸着電極の様子
Fig.4 Observation for chucking electrode.

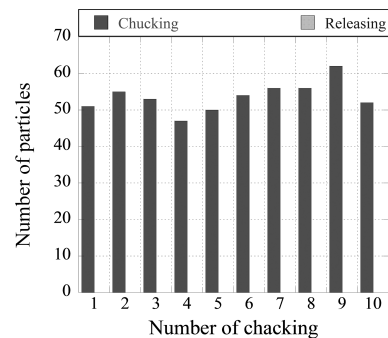


図5 1 mm 粒子の吸着・脱着特性
Fig.5 Chucking and releasing characteristic for $\phi 1.0$ mm particles

0であり、完全に脱着できていることが分かる。

このような粒子の吸着や脱着は、吸着電極への電圧の印加直後、あるいは、除電装置への電圧の印加直後の1秒以内に速やかに行われた。これは、対象となる粒子の抵抗が十分小さく、誘導電荷の移動が速やかに行われるためであり、粒子の抵抗が大きくなれば、吸着や脱着に要する時間は長くなることが予想される。

3.2 電極直径依存性

3.1と同じ構成で直径が2～8 mmの円柱状吸着電極を製作し、接触吸着による吸着量（個数）を測定した結果を図6に示す。電極の直径 D_e が大きくなるほど吸着量が多くなる傾向は式(7)と同様であり、 k_e は0.73～0.84であることが確認された。電極径に対して粒子径が大きいため隙間の割合も大きい。

3.3 印加電圧依存性

印加電圧を-0.5～-2.0 kVの範囲で変化させたときの接触吸着による吸着量（個数）を図7に示す。-0.5 kV時では、静電気力が小さかったため吸着させることができなかったが、-1.0 kV以上の電圧で粒子を吸着させることができた。式(1)と式(4)を用いて吸着に必要な最小電圧を算出すると-0.532 kVとなり、-0.5 kVでは吸着数が0になっている実験結果と符合する。-1.0 kV印加時の吸着量のばらつきが大きいのは、吸着電極をサーバ内に充填されている粒子群

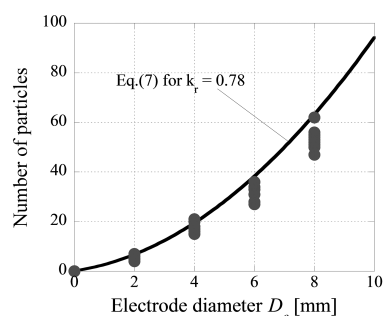


図6 電極径と吸着粒子数との関係
Fig.6 Number of chucked particles depending on the electrode diameter D_e .

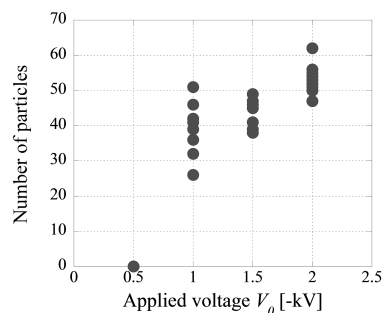


図7 電極への印加電圧と吸着粒子数との関係
Fig.7 Number of chucked particles depending on the applied voltage V_0 .

に接触させた際、最も上層にある粒子すべてが吸着電極と接触しているわけではないことを示唆している。吸着電極と粒子との間に空隙があると、誘導電荷が小さくなるため静電気力が小さくなり、十分な吸着力が得られない。この状態で電極を引き上げると、空隙なく電極に接触して十分な静電気力を得ている粒子のみが吸着されていることになる。印加電圧が十分に大きくなると、電極と粒子との間に多少の隙間が生じていても静電気力で粒子を電極に引き付けることができるため、吸着される粒子の数は増えるものと考えられる。吸着数のばらつきを小さくするには、十分大きな電圧を印加する必要がある。

3.4 接触吸着と飛昇吸着の比較

接触吸着と飛昇吸着を比較するために、吸着に必要な電界が小さい粒径 $300 \pm 10 \mu\text{m}$ の金属球（千住金属工業株式会社、エコソルダーボール M705 0.3 ϕ , 1粒の質量約 100 μg ）を粒子として用いた。この粒子が入ったサーバに直径 8 mm の吸着電極を埋め込み -2.0 kV の電圧を印加して接触吸着させたとき、このサーバ内の粒子群から吸着電極を約 1～2 mm 離れた位置において -2.0 kV の電圧印加で飛昇吸着させたときの様子をそれぞれ図8 (a), (b) に示す。接触吸着では隙間なく吸着されているが、飛昇吸着では粒子同士が隣接せずまばらに吸着されている様子が分かる。これは、粒子同士に静電反発力が働くことや粉粒体を吸着させた直下の電界が弱まることが原因と考えられる。2種類の吸着による吸着量（質量）の違いを図9に示す。縦軸は重さであるが、粒子1個の重さは 100 μg なので、個数に換算することもできる。接触吸着では 60～75 mg を吸着させることができた。粒径が 300 μm の粒子の最大吸

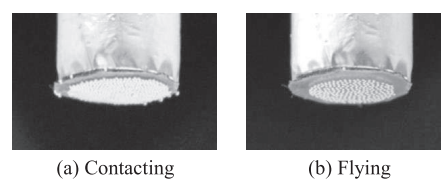


図8 接触吸着と飛昇吸着との付着状態の違い
Fig.8 Comparisons of contacting and flying chucking.

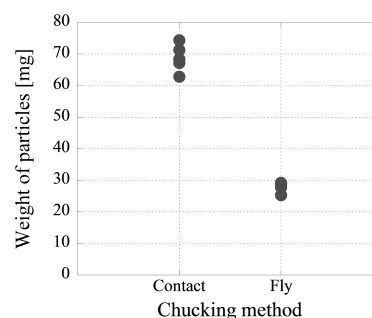


図9 吸着法による吸着重さの違い
Fig.9 Comparison of weight of the particles by chucking method.

着数 N_c の理論値は式(7)において $k_e=1$ とすると 765 個である。実際に吸着した粒子は 744 個であり、理論的な最大値とはほぼ一致した。粒径が小さいために隙間が小さくなり、 k_e が 1 に近づいた。飛昇吸着では 20~30 mg を吸着させることができた。これを数に変換すると最大 300 個である。一方、式(9)の理論式から $d=1\sim2$ mm の範囲で NF を算出すると 366~557 個となり、 $d=2.0$ mm の時におおよそ実測値と一致することが確認された。これらの結果から、粒子の径が一定であれば、式(7)や式(9)を用いてある程度吸着数を予測できることが分かった。

4. 分割電極による吸着制御

前節より電極径を変更することで吸着量を制御できることが明らかになった。しかし、サイズの違う電極に取り換えて吸着量の制御を行うことは手間となってしまう。そこで、1つの吸着電極で吸着量を調整できるように、図10に示すような5つの円柱電極を有する分割電極を試作した。図の斜線部はABS樹脂であり、5本の円柱電極は互いに絶縁されている。電圧を印加する電極の本数によって吸着量を変化させることを狙った。1つ1つの電極の周りに接地電極を配置できなかったため、吸着を行わない電極は接地することで、余分な粉粒体が静電気力によって吸着してしまうのを防いだ。1つの電極の直径 D_p は 1.6 mm である。電極1つに対する吸着最大量は、粒径 1.0 mm の粒子を吸着したとすると式(7)より6個となる。また、粒径 300 μm の粒子を吸着したとすると、式(7)より40個である。

試作した分割電極を用いて粒径 1.0 mm の粒子を、-2.0 kV の印加電圧で接触吸着させた際の吸着電極表面の様子を図11に示す。電圧を印加した電極の直下に粒子が吸着されているが、印加電極数が2本と5本のときは電極と電極の間にも粒子が吸着された。これは、電極1つ1つが接地電極でシールドされていないことに起因するものと考えられる。電極数による吸着量の違いを図12に示す。(a)は粒径 1.0 mm、(b)は粒径 0.3 mm の粒子を吸着した結果である。上記の理由により式(7)で得られる最大吸着量よりも多く吸着されたが、どちらの粒子でも印加電極数を増加させることで吸着量が増加したため、分割電極を用い

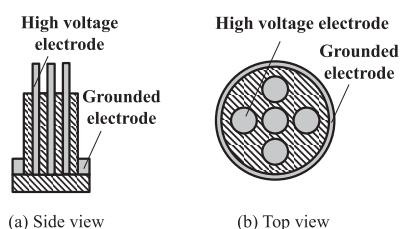


図10 分割型電極
Fig.10 Split electrode.

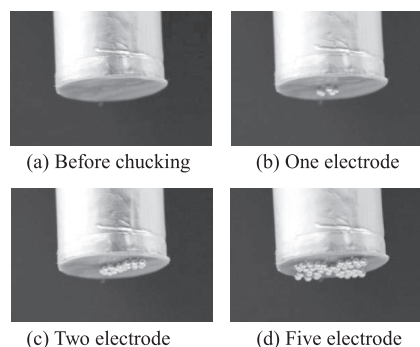


図11 分割型電極を用いた時の吸着状態
Fig.11 Observation for chucking electrode.

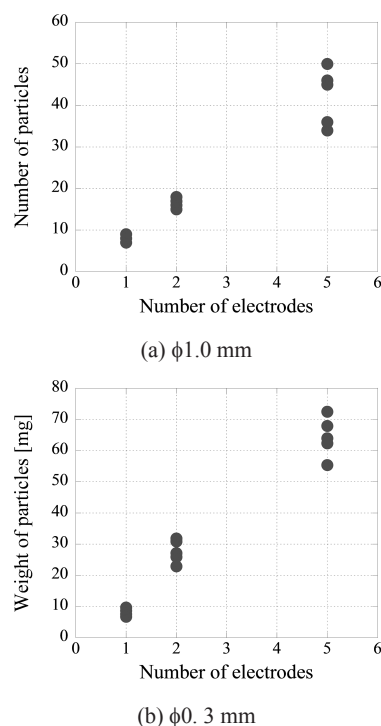


図12 電圧を印加する電極の数と吸着個数との関係
Fig.12 Chucking amount by split electrode for metal particle.

れば容易に吸着数を制御できることが確認された。

5. 検討

5.1 粒子1粒のみ吸着させる方法

本装置において、複数粒の粉粒体の吸着・脱着を行うことができた。吸着個数を正確に決めるため、分割電極のうちの1つの電極に1つの粒子を吸着させることができれば、電圧を印加する電極の数で粒子の数を制御できると考えられる。そこで、粒子1粒のみを吸着させるための条件について検討を行った。

式(7)より、最大吸着量を1に近づけるためには粒径 D_p よりも電極径 D_e をできるだけ小さくする必要がある。そこで、図10に示した分割電極の中心の電極 (1.6 mm) 1本に導電性を付与させた直径 2.0 mm、密度 1.19 mg/mm^3 のポ

表1 使用した種の諸特性と吸着・脱着実験の結果
Table 1 Chucking and releasing characteristics for test seeds.

Test seeds	Major axis (mm)	Minor axis (mm)	Weight (mg)	Chucking	Releasing
White radish sprouts	3.8 ± 0.33	3.1 ± 0.26	17.6 ± 2.8	○	○
Bamboo Shoots lettuce	4.3 ± 0.46	1.1 ± 0.23	1.46 ± 0.18	○	○
Spinach	4.2 ± 0.33	3.6 ± 0.31	16.6 ± 2.6	○	○
White stems mitsuba	5.1 ± 0.76	1.0 ± 0.040	2.50 ± 0.60	○	○
Arugula	2.0 ± 0.070	1.4 ± 0.15	1.83 ± 0.31	○	○
Mizuna	1.6 ± 0.43	1.2 ± 0.30	2.30 ± 0.66	○	○
Sweet basil	2.2 ± 0.14	1.2 ± 0.13	1.95 ± 0.22	○	○
Jew	2.1 ± 0.18	1.5 ± 0.36	1.14 ± 0.56	○	○

リカーボネイト（PC）球（佐藤鉄工株式会社）を粒子として吸着状態の確認を行った。印加電圧 -2.0 kV の接触吸着では吸着量が2～3個であった。式(7)よりこの条件で得られる最大吸着量は3個であり、理論値と同程度の吸着量となった。そこで、式(9)からも分かるように飛昇させることで吸着数の制御を試みたところ、粒子1粒のみを吸着させることができた。このように、条件を選べば分割電極1つに粒子1粒を吸着・脱着することもでき、吸着数を正確に制御することも可能であることが確認された。

5.2 種の吸着

本方式は、機械的な力ではなく静電気力でやさしく粒子を吸着・脱着できることが特徴の1つである。

その特徴を活かした粒子操作の1つとして人工播種への応用について検討した。近年では工場内で内部環境を整えることで野菜などの植物を計画的に生産する工場栽培が行われているが、種を植える作業は人の手で行われていることが多く、その機械化が期待されている。

表1に示す種の吸着試験を行ったが、大きさや重さが違っていてもすべての種の吸着・脱着を行うことができた。これらの種は、十分低い抵抗を持ち、電極に吸着するのに十分な誘導電荷が供給されたためと考えられる。

分割電極によって吸着量を制御する1例として、カイワレ大根の種の実験結果について述べる。この種は長径が約4 mm、短径が約3 mm であるが、質量が13.1～21.3 mg と個体によって質量差がある。この種を分割電極によって吸着させた際の結果を図13に示す。印加電極数

が1本では1個、2本では2～4個、4本では3～5個、5本では5～8個の種が吸着された。このことから、本方式によって吸着させる種の数进行を制御し、必要な数のみを播種できる可能性が示唆された。

6. まとめ

粉粒体用静電吸着・脱着装置を開発し、その基礎特性を明らかにした。接触吸着と飛昇吸着による吸着モデルを構築し、吸着電極の面積や印加電圧で吸着数が制御できることを明らかにし、実測によりモデルの妥当性を確認できた。また、粒径0.3～2.0 mm の球状粉粒体や長径1.6～5.1 mm の不定形粒子の吸着・脱着することができた。分割電極を用いることで、電圧を印加させる本数を変化させ、吸着量を制御させることができた。さらに、人工播種を目的とした植物の種の吸着実験として、カイワレ大根の種の吸着を行った結果、1～8個の間で吸着数を制御することができ、人工播種に応用できる可能性が示された。

今後は、粒径が一定ではなくばらついている粉粒体を一定量だけ吸着させる方法や、より小さい粒子を必要な数だけ吸着・脱着する方式について検討する。

7. 謝辞

本研究は科学技術振興機構研究成果展開事業地域産学バリュープログラム課題番号 VP29117940417 の支援を受けて行われたことを付す。

参考文献

- 1) 増田弘昭 他：化学工学論文集，pp.286-290（1976）
- 2) 特開 2001 - 319941
- 3) 三澤弘明 他：精密工学会誌，**63** [7]（1997）959-962
- 4) 江頭 満 他：化学工学論文集，pp.897-905（2017）
- 5) 川本広行 他：日本機械学会論文集（C編）73巻 735号，pp.56-166（2007）
- 6) 特開昭 59 - 129686
- 7) 大森拓磨 他：電気学会全国大会，pp.455（2017）
- 8) 後藤雄太 他：静電気学会春季講演会論文集，pp.29-32（2016）
- 9) 大久保豊 他：化学工学論文集第22巻第1号，pp.113-119（1996）
- 10) 大久保豊 他：化学工学論文集第22巻第3号，pp.603-608（1996）
- 11) 大久保豊 他：化学工学論文集第23巻第2号，pp.216-223（1997）

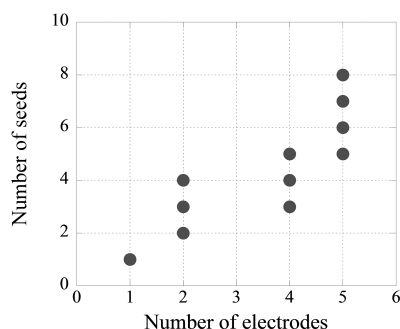


図13 分割電極によるカイワレ大根の種の吸着数制御
Fig.13 Chucking amount by split electrode for radish seeds.