

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03442

研究課題名(和文) 導体と誘電体を統合する電荷移動モデルの構築と帯電微粒子の状態・運動制御への応用

研究課題名(英文) Construction of charge transfer model for conductors and dielectrics and application for controlling charge and motion of fine particles

研究代表者

松坂 修二 (Matsusaka, Shuji)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：10219420

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、下部に平板電極、上部に網状電極を用い、下部電極に粒子を堆積させて電場を印加した。粒子層には下部電極と同じ極性の電荷が誘導帯電によって付与され、表層の粒子はクーロン力によって浮揚した。粒子の挙動および浮揚過程を高速度カメラで観察した結果、一次粒子だけでなく凝集粒子も浮揚することがわかった。誘電性粒子は静電場で分極し、静電相互作用によって鎖状凝集粒子を形成した。凝集粒子を構成する一次粒子のクーロン力の総和が粒子間付着力および重力を超えると浮揚した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微粉体は粒子の集合体であり、粒子間の付着力によって凝集する性質がある。個々の粒子に対して機械的外力を与えて粒子の運動を制御することは難しいが、静電場を用いて一度に多数の粒子に自発的な運動を可能にする駆動力を与えて遠隔で制御することは可能であり、本研究では粒子帯電・浮揚に必須の基礎技術を確立した。本技術は、印加電圧を変数とする簡便な操作で、静電場および粒子の帯電量を制御して、微粒子の分散・凝集制御に応用できるので、これまで難しいと言われてきた微粒子遠隔精密操作を効率的かつ飛躍的に発展させられる。

研究成果の概要(英文)：In this work, a plate electrode and a mesh electrode were used for lower and upper electrodes, respectively. Particles were piled on the lower electrode and an electric field was produced. Owing to induction charging, the electric charge polarity of the particle layer is identical to that of the lower electrode, leading to particles in the upper layer being levitated by Coulomb forces. The observation of both the particle behavior and the levitation process using a high-speed microscope camera showed that agglomerates as well as individual particles were levitated. The dielectric particles were polarized in the electric field, the electrostatic interaction between which leads to the formation of chain agglomerates. When the magnitude of the total Coulomb force of the primary particles consisting the agglomerate exceeded the interparticle and gravitational forces, the agglomerate levitated.

研究分野：化学工学，粒子工学，静電気工学

キーワード：粉粒体操作 電荷移動 帯電 粒子 運動制御

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

粉体プロセスにおいて、粒子の沈着・付着は、操作性あるいは生産性の低下を招くだけでなく、堆積した粒子の再飛散によって粉塵爆発などの重大な事故につながるため、対策を講じる必要がある。壁に付着した粒子を除去するために、機械的外力を用いることが多いが、静電気力を利用すると、粒子に自発的運動を行わせることができるので、分離、分級、分散、混合など、多くの粒子操作において静電技術に注目が集まっている。

平行平板電極を用いると一様電場が形成され、浮遊する帯電粒子の運動は静電場に支配される。導電性粒子が電極に接すると、接触部を介して自由電子が移動し、誘導帯電によって粒子は電極と同符号になる。帯電した粒子のクーロン力が逆向きの力より大きくなったとき、対向電極に向かって浮揚・移動する。対向電極に達した粒子は、その電極と同符号に帯電するので、粒子の帯電極性は反転し、元の電極に向かって移動する。すなわち、粒子は平行平板電極間で往復運動を繰り返す。電気伝導度の高い粒子は、電極との接触において瞬時に誘導帯電を完了するが、電気抵抗の増加とともに誘導帯電に時間を要するようになり<sup>1,2)</sup>、往復運動の周期も長くなる。電気抵抗が極めて高い場合、誘導帯電は生じず、接触帯電が支配的になり<sup>3)</sup>、この条件では粒子は浮揚しない。なお、平行平板間に存在する各粒子の運動は独立しているため、多数の粒子が存在すれば、正あるいは負に帯電した粒子が混在することになる。

水平に置かれた平行平板電極間から任意の極性の帯電粒子を取り出すには、電極に開口部を設ける必要がある。上部電極を網状電極に変更すると、その上部に同極性に帯電した粒子群が存在し、各粒子間には静電反発力が生じるので、単極荷電粒子を分散状態で維持できる。ただし、帯電粒子の運動はクーロン力、重力、粒子慣性、流体抵抗に支配され、外部電界強度、粒子径、粒子形状、粒子密度、表面物性に依存するので、粒子の運動制御性を高めるには条件を制御する必要がある。外部電場を印加すると、帯電に加えて粒子表面に電荷の偏りも生じる。粒子が自由電子を保有する場合、粒子内に生じる電位差を打ち消すように電子が移動する。すなわち、静電誘導が生じる。また、粒子が誘電体の場合には、電気双極子の整列によって誘電分極が生じる。これらの現象を利用すると、粒子の分散と凝集の制御が可能になる。粉体プロセスでは、高度な静電技術の利用に期待が寄せられており、新しい応用技術の開発に必要な基礎研究が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究では、下部に平板電極、上部に網状電極を用い、下部電極の粒子層を気相中に浮揚させる実験を行い、粒子の帯電および挙動を明らかにすることを目的とする。粒子の凝集および浮揚過程を高速度カメラで追跡するとともに、電極間の電場数値解析ならびに浮揚粒子の運動解析によって帯電量を推定し、粒子の凝集・浮揚機構を解明する。

### 3. 研究の方法

Fig. 1 に、実験装置の概略構成を示す。上部網状電極は着脱式であり、下部平板電極とは 10 mm 離して配置した。上部電極は接地してあり、下部電極に粒子を自由落下させて任意の厚さの粒子層を形成後、電極間に鉛直上向きの静電場を形成した。静電気力によって粒子層の表面から浮揚する粒子の挙動を高速度カメラで撮影した。光源にはメタルハライドランプを使用した。試料粒子は、120℃ で 12 時間以上乾燥させたのち、デシケータ内で粒子を室温まで下げて実験に使用した。

### 4. 研究成果

#### (1) 粒子の凝集と浮揚

Fig. 2 に、粒子層の表面近傍を正面から撮影した静止画を示す。下部電極に電圧を印加すると、同図に示すように、一次粒子または鎖状凝集粒子が連続して浮揚した。粒子は下部電極への電圧の印加によって帯電しているため、粒子層を介して粒子層の表面に電荷が移動したことになる。粒子間の付着力は表面状態の違いによって分布が生じ、付着力の小さい粒子から順に浮揚する。

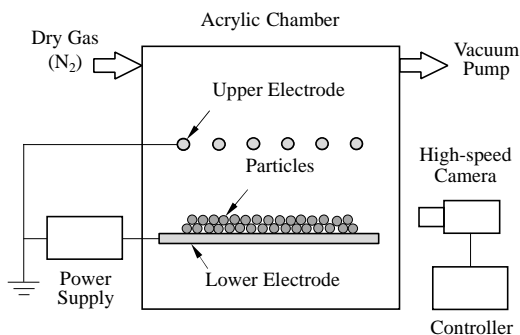


Fig. 1 Experimental setup

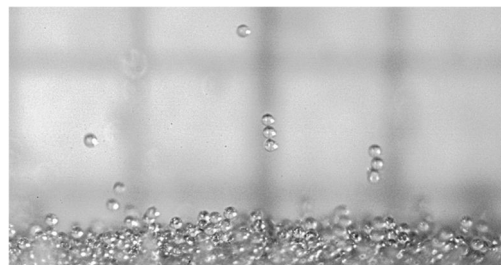


Fig. 2 Snapshots: levitation of primary particles and chain agglomerates

一次粒子の帯電量が小さく、十分な分離力(クーロン力)が得られない場合でも、帯電粒子が鎖状に凝集して各粒子のクーロン力の総和が大きくなると、浮揚は可能と考えられるが、構成粒子数の増加とともに下部粒子に加わる重力も大きくなるので、力の均衡によって浮揚の可否が決まる。

### (2) 浮揚粒子の運動

Fig. 3 に、粒子層の表面から浮揚する一次粒子の運動を 2 ms の時間間隔で示す。外部電場によるクーロン力が浮揚の駆動源であり、粒子は鉛直上方に加速し、流体抵抗との均衡によって終末速度に達する。高速度カメラによって浮揚粒子の上昇過程を捉えることができるので、粒子の帯電量は、重力と流体抵抗を考慮した運動解析によって推定できる。解析法の詳細は次項に記す (Fig. 5 参照)。

Fig. 4 は、粒子層の表面で鎖状に凝集して浮揚する様子を 10 ms の時間間隔で示したものである。下部電極に電圧を印加すると誘導帯電によって粒子表面の電荷は増加し、粒子は鉛直上方に移動し始めるが、静電場で生じる粒子の誘電分極によって鉛直方向に隣接する粒子間に引力が生じ、下部に接触する粒子は上方に引き上げられる。この繰り返しによって鎖状凝集粒子が形成される。凝集粒子を構成する粒子のクーロン力は上向きに作用するので、最下部に位置する鎖状凝集粒子には上部のクーロン力の総和が作用する。

同図では 9 個の一次粒子のクーロン力が 10 個目の粒子との付着力を超えたために力の均衡が崩れて浮揚した。なお、鎖状粒子の形成過程において、粒子層表面の粒子は垂直方向に移動するだけでなく、水平に隣接する粒子の上に移動する場合もあった。

### (3) 浮揚粒子の帯電量と粒子間付着力

Fig. 5 に、粒子の浮揚高さの経時変化に関する理論計算結果(実線)と実験結果(丸印)を示す。計算結果のパラメータは粒子の電荷である。実験結果は、0.134 pC の計算結果と良好に一致しており、粒子軌跡の理論計算結果との対比によって浮揚粒子の帯電量を推定できる。

Fig. 6 に、浮揚する一次粒子の単位質量あたりの帯電量(比電荷)に及ぼす粒子層の厚さの影響を示す。粒子層の厚さが 0 のとき(すなわち、一次粒子が下部電極に接触しているとき)浮揚粒子の比電荷は約 170  $\mu\text{C}/\text{kg}$  であったが、厚さが 0.5 mm 以上の粒子層の表面から浮揚する粒子の比電荷は約 90  $\mu\text{C}/\text{kg}$  であった。

粒子層の有無による比電荷の違いは、粒子の付着力に関係しており、誘導帯電に基づく電気影像力の影響によるものである。導体との接触による電気影像力は、誘電体との接触によるものより大きいので、粒子の浮揚に必要なクーロン力および比電荷も大きくなければならない。なお、誘電性粒子では、粒子表面で生じる誘導帯電は瞬時に完了するのではなく、接触部を介して時間の経過とともに進行するので、電荷の幾何学的配置によって初期段階では電気影像力の方がクーロン力より大きく、電荷が十分に移動して上向きのクーロン力が下向きの力を超えたとき、粒子は浮揚する。なお、電極から浮揚した粒子の比電荷は、誘導帯電による金属粒子の飽和帯電量<sup>4)</sup>と同程度であり、粒子層から浮揚した粒子の値は約 1/2 であった。印加電圧を下げると粒子の浮揚は遅れるが、これも誘導帯電の時間依存性によるものと考えられる。

Fig. 7 は、厚さ  $1.5 \pm 0.5$  mm の粒子層の表面から浮揚した粒子の比電荷と構成粒子数の関係を示したものであり、構成粒子数の増加とともに平均比電荷が減少することが分かる。鎖状凝集粒

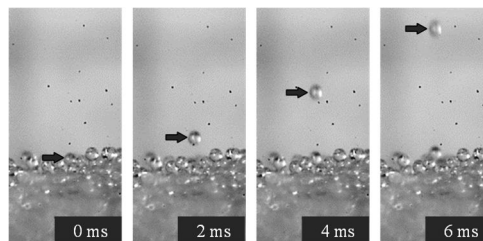


Fig. 3 Levitating particle

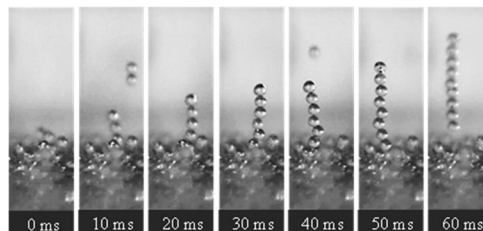


Fig. 4 Agglomeration and levitation

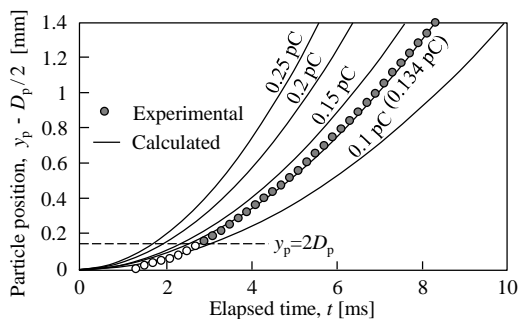


Fig. 5 Particle position as a function of elapsed time with a parameter of particle charge

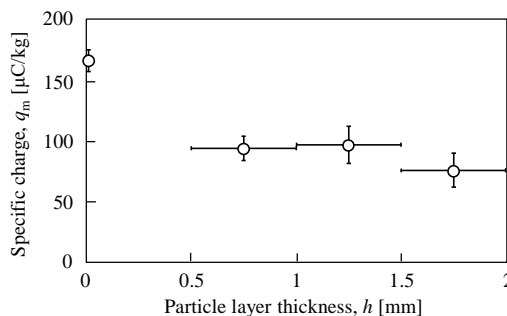


Fig. 6 Effect of particle layer thickness on the specific charge of levitating particle

子を形成すると構成粒子のクーロン力の総和が分離力として作用するので、粒子の平均比電荷が小さくても、浮揚の要件は満たされる。

Fig. 8 は、凝集粒子の総電荷から推算した粒子間付着力を構成粒子数に対して示したものであり、粒子間付着力は、構成粒子数の増加とともに大きくなるのが分かる。これは、付着力の大きい粒子を浮揚させるには、クーロン力の総和を大きくする必要があるのである。

#### (4) 凝集粒子および粒子層内の電位分布

下部電極上の粒子層内およびその上部の電位分布を調べるため、直交座標系で電場数値解析を行った。

Fig. 9 に、正方配列を仮定した厚さ 1 mm の粒子層に、3 個の一次粒子から成る鎖状凝集粒子を想定して計算した電位分布を示す。粒子層内の等電位線の間隔は比較的広いが、鎖状凝集粒子の等電位線の間隔は狭い。すなわち、粒子層内と比べて凝集粒子中の電界強度が大きいことが分かった。

Fig. 10 に、鉛直方向の電界強度のプロファイルを示す。粒子層内には、粒子の配列と同期した周期的電界強度がみられ、各粒子の表面で電界強度が相対的に高くなることが分かった。粒子層の上部に位置する鎖状凝集粒子においても周期的電界強度が見られるが、粒子層内に比べて電界強度の値は明らかに大きいので、粒子の分極および粒子間付着力も大きいと考えられる。この影響は粒子層の上部第 1 層に達しており、凝集粒子がクーロン力によって上方に移動すると、第 1 層の粒子も引き上げられ、構成粒子数が増えていくことが示唆される。第 2 層以下の粒子も力学的に安定な状態に推移すると考えられるが、分極に基づく付着力が小さいので、第 1 層の粒子に引き上げられる可能性は幾分低く、第 2 層の粒子が第 1 層の位置に達したとき、付着力は大きくなると予想される。

以上の検討結果をまとめると、凝集粒子の中段では破断されにくく、粒子層の第 1 層で破断が生じて浮揚に至る可能性が高い。実際には、粒子層の充填状態は不規則であり、粒子間付着力にも分布が存在するので、現象は複雑であるが、基本的な粒子の凝集・浮揚機構は説明できた。

#### (5) まとめ

下部平板電極に電圧を印加し、上部網状電極を接地して、下部電極に堆積させた粒子を気相中に浮揚させる実験および電場解析を行い、以下の結論が得られた。

下部電極に電圧を印加すると、粒子層を介して粒子層の表面に電荷が移動し、粒子は下部電極と同符号に帯電する。帯電粒子は、一次粒子または凝集粒子として対向電極に向かって浮揚する。

浮揚する粒子は一次粒子が比較的多いが、凝集粒子も浮揚する。

粒子がクーロン力によって上向きに移動し始めると、その下部に隣接する粒子も分極に基づく引力によって引き上げられる

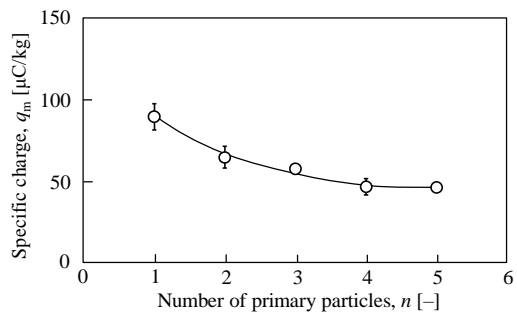


Fig. 7 Relationship between specific charge and the number of primary particles in levitated agglomerate

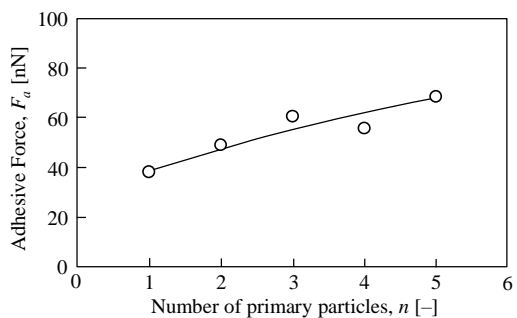


Fig. 8 Relationship between adhesion force and the number of primary particles in levitating agglomerate

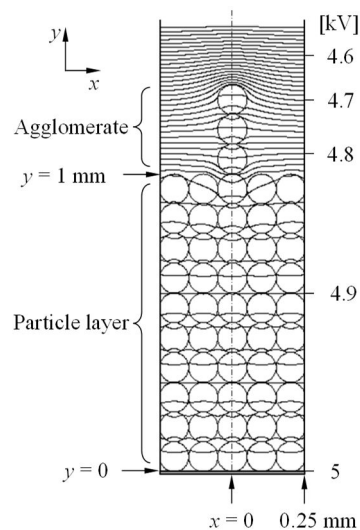


Fig. 9 Electric potential distribution obtained by numerical method

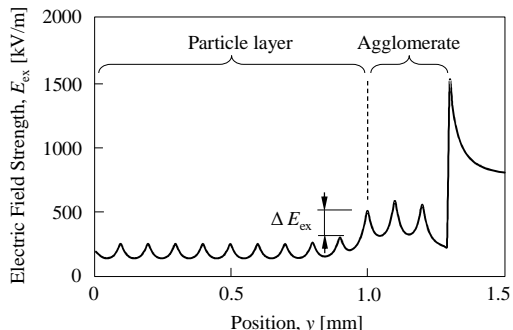


Fig. 10 Profile of vertical electric field strength ( $x=0$ ) agglomerate

ので、鎖状凝集粒子が形成される。鎖状凝集粒子が水平方向に隣接する粒子の上に移動して構成粒子数を増やしていくこともある。

下部電極と接触している粒子が浮揚する場合と比較して、粒子層の表面から浮揚する粒子の方が比電荷は小さい。電気映像力は、導体との接触よりも誘電体との接触の方が小さいので、比電荷が小さくても粒子の浮揚に必要なクーロン力が得られる。

凝集粒子の比電荷は、構成粒子数の増加とともに減少する。これは、鎖状凝集粒子を形成すると構成粒子のクーロン力の総和が分離力として作用するので、各粒子の比電荷が小さくても、浮揚の要件を満たすためである。

粒子の付着力は一定ではなく、種々の要因によって分布が存在する。付着力の大きい粒子を浮揚させるには、クーロン力の総和を大きくする必要があるので考えられる。

粒子層の表面に形成される凝集粒子は、粒子層内より電界強度が高く、分極による粒子間付着力は大きくなるので、凝集粒子の中段では破断しにくく、粒子層の第1層で破断が生じて浮揚に至る。

#### < 引用文献 >

- 1) Wu, Y. and G. S. P. Castle, I. I. Inculet, S. Petigny, G. S. Sweij; "Induction Charge on Freely Levitating Particles," Powder technol., 135, 2003, 59-64.
- 2) Nader, B. F., G. S. P. Castle and K. Adamiak; "Effect of surface conduction on the dynamics of induction charging of particles," J. Electrostat., 67, 2009, 394-399.
- 3) Matsusaka, S., H. Maruyama, T. Matsuyama and M. Ghadiri; "Triboelectric Charging of Powders: A review," Chem. Eng. Sci., 65, 2010, 5781-5807.
- 4) Cho, A. Y. H.; "Contact Charging of Micron sized Particles in Intense Electric Fields," J. Appl. Phys., 35, 1964, 2561-2564.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Mizuki Shoyama, Shuhei Nishida and Shuji Matsusaka	4. 巻 30
2. 論文標題 Quantitative analysis of agglomerates levitated from particle layers in a strong electric field	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 2052 ~ 2058
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.appt.2019.06.018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mizuki Shoyama and Shuji Matsusaka	4. 巻 198
2. 論文標題 Mechanism of disintegration of charged agglomerates in non-uniform electric field	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Science	6. 最初と最後の頁 155 ~ 164
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ces.2018.12.055	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mizuki Shoyama, Takumu Kawata, Masatoshi Yasuda and Shuji Matsusaka	4. 巻 29
2. 論文標題 Particle electrification and levitation in a continuous particle feed and dispersion system with vibration and external electric fields	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 1960 ~ 1967
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.appt.2018.04.022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Mizuki Shoyama and Shuji Matsusaka	4. 巻 43
2. 論文標題 Electric Charging of Dielectric Particle Layers and Levitation of Particles in a Strong Electric Field	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 KAGAKU KOGAKU RONBUNSHU	6. 最初と最後の頁 319 ~ 326
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1252/kakoronbunshu.43.319	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

[学会発表] 計19件(うち招待講演 9件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Shuji Matsusaka
2. 発表標題 Electrostatics of particles in Gases
3. 学会等名 International Multiphase Flow Technology Forum (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mizuki Shoyama, Takumu Kawata, Masatoshi Yasuda and Shuji Matsusaka
2. 発表標題 A New Method for Particle Dispersion by induction Charging
3. 学会等名 PARTEC 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松坂修二
2. 発表標題 気相粒子の静電気力の評価とプロセスへの影響
3. 学会等名 日本粉体工業技術協会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 庄山瑞季, 松坂修二
2. 発表標題 電場内の粒子帯電に伴う凝集・浮揚・分散機構
3. 学会等名 粉体工学会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松坂修二
2. 発表標題 微粉体の諸現象と関連技術
3. 学会等名 資源・素材学会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松坂修二
2. 発表標題 粉体の帯電の基礎と最新のトピックス
3. 学会等名 日本粉体工業技術協会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 庄山瑞季，松坂修二
2. 発表標題 堆積粒子層内の電位分布と粒子の浮揚
3. 学会等名 粉体工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岸本 昌憲，安田 正俊，松坂 修二
2. 発表標題 外部電場下における帯電微粒子に作用する付着力の電界強度依存性
3. 学会等名 化学工学会第84年会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 吉岡 寛展, 庄山 瑞季, 松坂 修二
2. 発表標題 誘電性粒子層への紫外線照射による粒子の帯電と浮揚
3. 学会等名 化学工学会第84年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mizuki Shoyama, Shuji Matsusaka
2. 発表標題 Electrification and Dispersion of Particles Using Mesh Electrode
3. 学会等名 8th World Congress on Particle Technology (WCPT8) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 庄山 瑞季, 松坂 修二
2. 発表標題 不平等電場中の凝集粒子の分散メカニズム
3. 学会等名 化学工学会秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松坂 修二
2. 発表標題 粉粒体の帯電特性評価と制御に関する研究
3. 学会等名 化学工学会第83年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 庄山 瑞季, 西田周平, 松坂 修二
2. 発表標題 粉体層中の帯電粒子の凝集・浮揚に及ぼす外部場と特性の影響
3. 学会等名 粉体工学会秋期研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松坂 修二
2. 発表標題 微粉体の乾式操作研究の最近の動向 - 振動と静電場の活用 -
3. 学会等名 粉体工学会秋期研究発表会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mizuki Shoyama, Shuji Matsusaka
2. 発表標題 Charging and Levitation of Small Particles by Mesh Electrode
3. 学会等名 Annual Meeting of the Electrostatics Society of America (ESA 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takumu Kawata, Masatoshi Yasuda, Shuji Matsusaka
2. 発表標題 Continuous Feeding of Dispersed Particles by Vibration and External Electric Field
3. 学会等名 The 7th Asian Particle Technology Symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松坂修二
2. 発表標題 粒子帯電および電荷生成機構
3. 学会等名 平成29年度第2回室内環境学会微粒子分科会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 庄山 瑞季, 松坂 修二
2. 発表標題 電場中の誘電性粉体層における凝集粒子の帯電と浮揚
3. 学会等名 化学工学会秋季研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 庄山 瑞季, 松坂 修二
2. 発表標題 網状電極を用いた誘電性粉体層における単極性粒子の分離
3. 学会等名 粉体工学会秋期研究発表会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 K. Higashitani, H. Makino and S. Matsusaka	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Taylor & Francis Ltd	5. 総ページ数 647
3. 書名 Powder Technology Handbook	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----