

粉体混合による放電抑制の可能性

庄山 瑞季*¹

粉体を取扱う事業場において、静電気が原因とされる火災・爆発事故が後を絶たない。本稿では、異符号に帯電させた粒子群の混合により粉体供給における電荷蓄積を軽減し、放電を抑制する方法について紹介する。振動と静電場によって粒子を浮揚させる2台の装置から、同一または異なる種類の荷電粒子を分散させた状態で連続的に供給し、装置間で瞬時に混合しながら堆積させる実験を行った。その結果、各装置の電場の向きによって堆積粒子の混合状態が変化し、各装置から逆極性の荷電粒子を供給したとき粒子は均一に混合されることが分かった。測定した浮揚粒子の比電荷を用いて空間電場と粒子の軌跡を計算し、混合メカニズムを解明した。さらに、粒子の混合状態をシャノンエントロピーによって定量的に評価した。

キーワード：粉体混合，電場，帯電，分散，浮揚，放電抑制

1 はじめに

近年、粉体産業分野の拡大や機能性材料の開発による粒子の微細化に伴い、粉体を取扱う事業場における火災・爆発事故が増加している。特に、ホッパーやサイロなどへの粉体充填プロセスでは、配管輸送中に粒子が内壁に繰り返し接触して帯電するので、粉体充填中にサイロ内に電荷が蓄積されて静電気放電が発生し、重大な事故につながる危険性がある。そのため、イオン噴射によって帯電粒子を中和する除電器が一般に利用されているが、粉体の電荷量と発生イオンのバランスが常に取れている必要があり、充填速度（粉体流量）の変化によってそのバランスが崩れると中和効率が低下してしまう。

そこで、粉体の流路を二手に分け、互いに極性が逆の粒子群を混合しながら充填すれば、充填速度に関係なく電荷蓄積を軽減しサイロ内で発生する静電気放電を抑制することができる可能性がある。しかしながら、粒子はサイズが小さくなるほど凝集しやすく、均一に混合するのは難しい。微粒子の分散には液相を利用するのが一般的であるが、同じ極性に帯電した粒子間に働く静電反発を利用すれば、気相中で互いに接触することなく分散状態を保ったまま粒子を輸送することができる。また、異なる極性に帯電した粒子群の間に作用する静電引力を利用すれば、空間中で互いに引き付け合わせながら混合できる可能性もある。

これまでの研究では、電場と振動を利用して分散した粒子を連続的に送り出す装置を開発した^{1,2)} この装置は、振動フィーダー、上部メッシュ電極、下部平板電極で構成されており、電極間の電場によって下部平板電極に連続的に供給される粒子に電荷が誘導され、帯電した粒子が浮揚する。

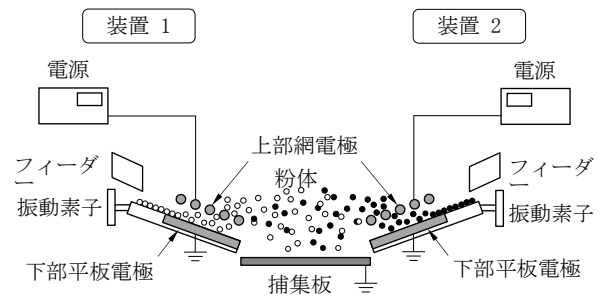


図1 粒子混合システム

本稿では、この装置を2台使用し³⁾、各装置から異なる極性に帯電した粒子群を分散状態で連続的に浮揚させ、装置間で混合・電氣的に中和しながら堆積させる方法を紹介する。なお、本稿は国際誌で発表されている既発表論文⁴⁾の概要紹介であり、国内でさらに広く周知するためのものである。

2 粒子の混合実験方法

図1に、粒子混合システムの概略を示す。本システムは、粒子を連続的に分散供給する装置2台で構成され、装置間距離が50 mmとなるよう左右対称に設置されている。各装置は、粒子を供給するフィーダーと、傾斜させた下部平板電極（65 × 45 mm）および上部網状電極（65 mm × 45 mm、ワイヤー径：0.29 mm、目開き：1.3 mm）を有し（電極間距離：10 mm）、フィーダーから排出された粒子は振動によって下部平板電極上を流動する。

各装置の下部平板電極は接地されており、上部電極に直流電圧 V_1 または V_2 を印加すると、上下部電極間に静電場が形成される。この電場によって、流動粒子は下部平板電極と同極性に誘導帯電し、クーロン力が作用して浮揚する。これらの浮揚粒子は、上部電極を一旦通過した後すぐに引き戻されて上部電極上に付着するが、しばらくすると逆極性に誘導帯電し再浮揚する¹⁾。

本研究では、各装置から浮揚した粒子群を装置間で混合する実験を行った。試料粒子として、粒子径50 μm の球形アルミナ粒子と粒子径45 μm の球形フェライト粒子を用いた。また、吸引式ファラデーカップによる浮揚粒子の比電荷測定、および高速度カメラによる混合時の撮

原稿受付 2022年11月11日 (Received date: November 11, 2022)

原稿受理 2022年12月15日 (Accepted date: December 15, 2022)

J-STAGE Advance published date: January 23, 2023

*1 労働安全衛生総合研究所新技術安全研究グループ

(併) 電気安全研究グループ

連絡先：〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6

労働安全衛生総合研究所新技術安全研究グループ

(併) 電気安全研究グループ 庄山瑞季

E-mail: shoyama-mizuki@s.jnioosh.johas.go.jp

doi: 10.2486/josh.JOSH-2022-0023-KE

影を行った。さらに、混合させた粒子を金属板に堆積させ、画像解析による粒子の混合度評価を行った。

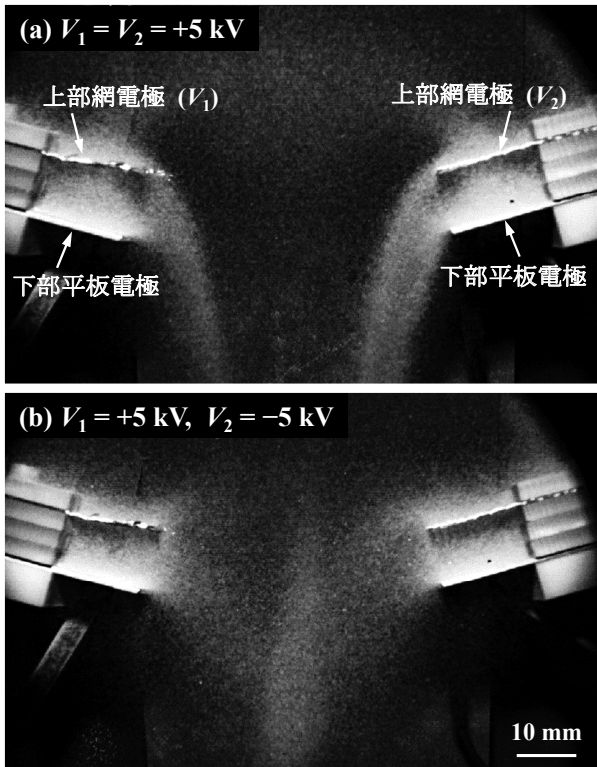


図2 混合中の粒子

3 電場の向きが粒子の運動と混合に及ぼす影響

1) 混合中の粒子の挙動

2つの装置それぞれにアルミナ粒子を供給し、混合させた。図2に、高速度カメラで撮影した混合中の粒子の画像を示す。各装置の上部電極に $V_1 = V_2 = +5$ kVの電圧を印加したとき(図2(a)),各装置から浮揚した粒子は装置間中心に近づくことなく落下した。2つの装置から浮揚した粒子群は同極性であるので、粒子群間に作用する静電反発によって接近できなかったと考えられる。一方、 $V_1 = +5$ kVおよび $V_2 = -5$ kVの電圧を印加したとき(図2(b)),各装置から浮揚した粒子は装置間中心で混合しながら落下した。この場合、2つの装置から浮揚した粒子群は異なる極性に帯電しているため、静電引力によって互いに引き付けあったと考えられる。

なお、本装置では上部電極に到達しない粒子が発生するが、粒子の供給速度および電界強度によって粒子の浮揚割合は調整できる¹⁾。

2) 電場解析

図3に、有限要素法を基礎とする汎用ソフトウェア(COMSOL Multiphysics, AB/COMSOL, Inc.)を用いて解析した、本システムにおける電位分布と電場の向きを示す。 $V_1 = V_2 = +5$ kVのとき(図3(a)),装置間の水平方向における電位はほぼ一定で電界強度が小さいため、この領域で粒子に作用するクーロン力は小さく、各装置から浮揚した粒子は主に慣性と重力によって運動すると考えられる。一方、 $V_1 = +5$ kVおよび $V_2 = -5$ kV(図3

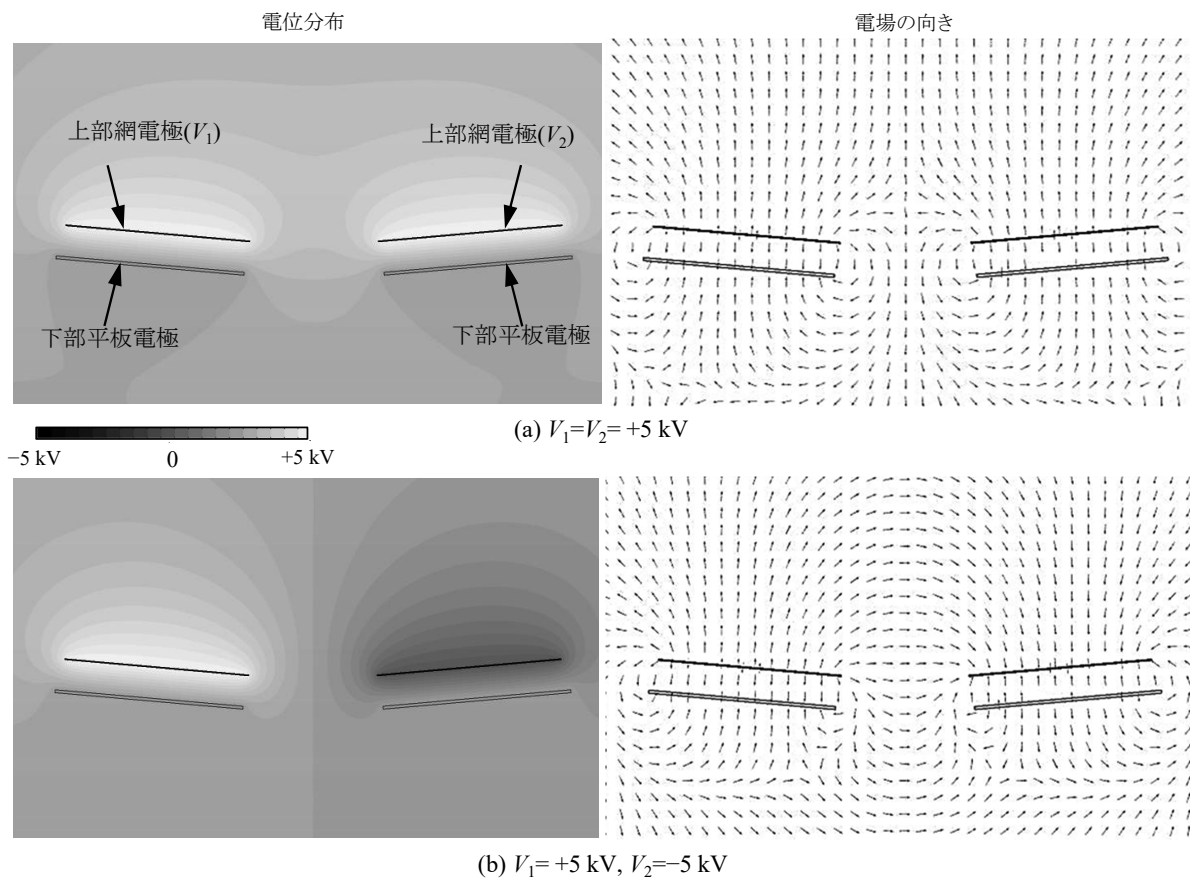


図3 電位および電場の向き

(b)) のとき、装置間に水平方向の電位分布があるため、浮揚粒子には慣性と重力に加え、外部電場によるクーロン力も作用すると考えられる。

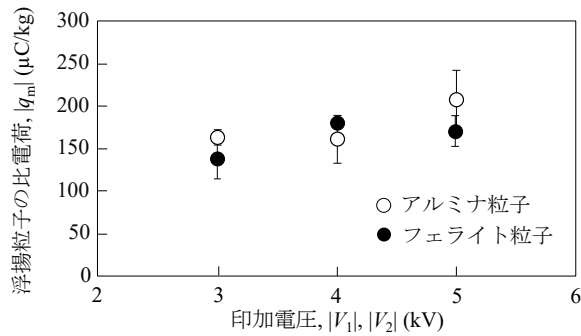
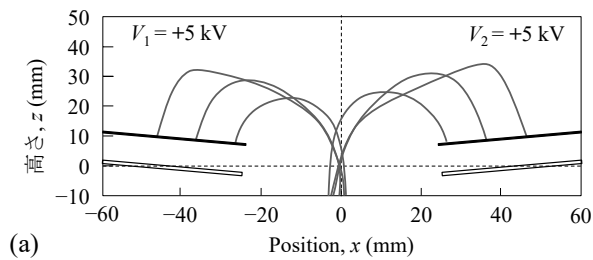
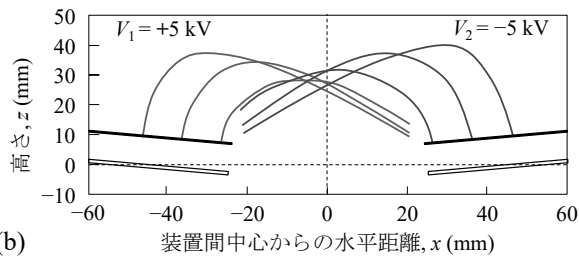


図4 浮揚粒子の比電荷と印加電圧の関係



(a)



(b)

図5 浮揚粒子の軌跡

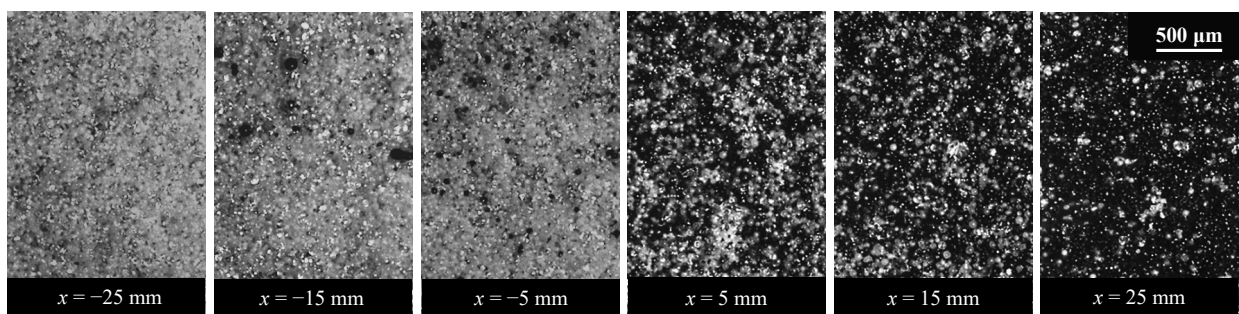
4 異種粒子の混合

1) 浮揚粒子の比電荷

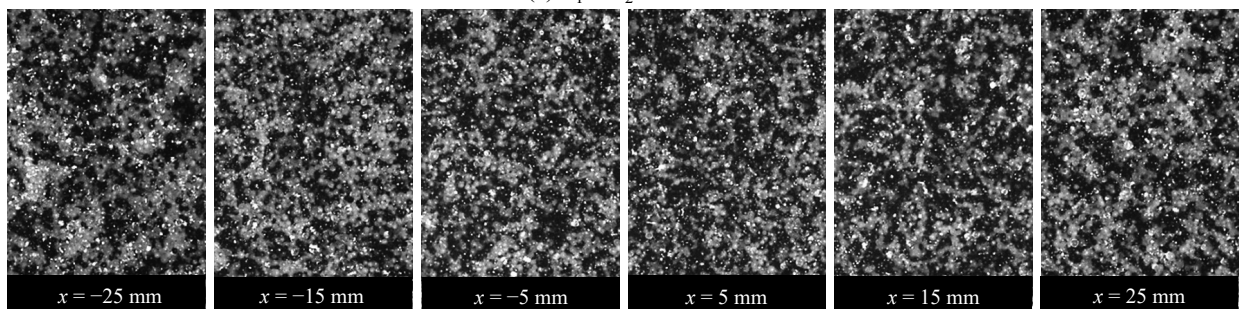
一方の装置にアルミナ粒子を供給し、他方の装置にフェライト粒子を供給して、それぞれの装置から浮揚した粒子群を混合させた。図4に、各装置から浮揚した粒子の比電荷と印加電圧の関係を絶対値で示す。各装置から浮揚した粒子の比電荷は、印加電圧によらずほぼ一定(150–160 μC/kg)であった。

2) 粒子の運動

図5に、剛体モデルを用いて各上部電極から浮揚する粒子の軌跡を計算した結果を示す。なお、これらの軌跡は、静電気力(外部電場によるクーロン力、電気影像力、グレーディエント力)、重力、空気抵抗を考慮した運動方程式によって計算しており、粒子間に作用する静電気力は考慮していない^{2,5)}。左側の装置からアルミナ粒子、右側の装置からフェライト粒子をそれぞれ浮揚させ、粒子の帯電量はいずれも測定値(150 μC)とした。粒子の各位置における電界強度は電場解析の結果(図3)を利用した。V1 = V2 = +5 kVのとき(図5(a))、粒子は装置間中心まで運動したのち落下する結果となったが、実際は粒子間に静電反発力が作用するので、中心に近づくことなく落下したと考えられる(図2(a))。一方、V1 = +5 kVおよびV2 = -5 kVのとき(図5(b))、上部電極から浮揚した粒子は、各装置の上部電極間に形成された電場によって、もう一方の上部電極へ向かって運動し、逆極性の粒子と装置間中心で交差する。しかし実際には、粒子間に作用する静電引力によって、装置間中心で接近した2つの粒子群が交差して離れる際に互いに引きとめ合うため、他方の上部電極に到達せずに落下したと考えられる(図2(b))。



(a) $V_1 = V_2 = +5$ kV



(b) $V_1 = +5$ kV, $V_2 = -5$ kV

図6 堆積粒子の画像

3) 混合度の定量評価

各装置の下端から15 mm下の高さに、接地された金属板を固定し、その上に装置間で混合させた粒子を堆積させた。図6に、2種類の粒子を5秒間堆積させた後、上側から撮影した堆積粒子の画像を示す。白色と黒色の粒子はそれぞれ、アルミナ粒子とフェライト粒子であり、 x の値は水平方向における装置中心からの距離を示している。 $V_1 = V_2 = +5$ kVのとき(図6(a)),位置によって混合状態は異なっており、2つの粒子は均一に混合されていないと考えられる。一方、 $V_1 = +5$ kVおよび $V_2 = -5$ kVのとき(図6(b)),全ての位置で混合状態がほぼ一定であり、均一に混合されていると考えられる。

これらの堆積画像を用いて、シャノンエントロピーによる混合度の定量評価を行った。検査領域を均等サイズのサブセルに分割すると、規格化された条件付きシャノンエントロピー S は次式で表される^{6,7)}。

$$S = \frac{S_{\text{location}}(\text{species})}{\ln C} \quad (1)$$

ここで、 $S_{\text{location}}(\text{species})$ および C はそれぞれ、条件付きエントロピーおよび粒子の種類数であり、

$$S_{\text{location}}(\text{species}) = -\sum_{j=1}^M [p_j \sum_{c=1}^C \{p_{c,j} \ln(p_{c,j})\}] \quad (2)$$

ここで、 M 、 p_j および $p_{j,c}$ はそれぞれ、サブセルの数、粒子総数に対するサブセル j 中の粒子数の割合、サブセル j 中の粒子数に対する粒子種 c の粒子数の割合であり、 S は完全分離である0から完全混合である1の範囲の値をとる。 $C = 2$ 、 $M = 256$ として評価を行った結果、位置によらず S の値はほぼ一定(0.96)であった。これは、 $V_1 = V_2 = 0$ の条件で両装置の下端から落下した粒子を捕集し、二軸式混合攪拌器を用いて300 rpmで60秒間、機械的に回転混合した場合と同程度であり、本システムによって、異種粒子が短時間で均一に混合され、電気的にも中和できる可能性を示せたといえる。

5 まとめ

電場と振動を利用した2つの装置を対称に配置した粒子混合システムを用いて、帯電した分散粒子群を空気中で二方向から供給し、混合させながら電気的に中和させる実験を行った。各装置の電場の向きを揃えて同極性の粒子を供給させた場合、粒子群間に作用する静電反発によって粒子は混合されなかった。一方、各装置の電場の向きを互いに逆にすると、異なる極性の帯電粒子が供給され、粒子群間の静電引力および外部電場によるクーロン力によって粒子は均一に混合された。さらに、2種類の粒子を逆極性に帯電させて混合すると、堆積位置に関係なくシャノンエントロピーは約0.96となり、このシス

テムによって瞬時的かつ均一な混合が実現され、電気的にも中和される可能性を示すことができた。

6 今後の展望

本技術は、帯電粒子間に作用する静電引力と静電反発力を利用して、粒子を分散させた状態で輸送、混合しながら電気的に中和し、堆積させるものである。堆積させた粒子層内は、凝集粒子が少なく、かつ均一に積層させられるため、3Dプリンターや全固体電池などの分野への応用が期待される。また、本技術は電場のみによって粒子の分散・輸送・積層を行っており、流体抵抗を利用しない。したがって、月面や火星など宇宙開発での利用も可能であると思われる。

謝 辞

本研究は、JSPS科研費21K14449および粉体工学情報センターの助成を受けたものである。本研究に携わって頂いた京都大学大学院工学研究科 松坂修二教授、同研究室の皆様、ならびに労働安全衛生総合研究所 電気安全研究グループ 崔光石部長に心より御礼申し上げる。

文 献

- 1) Shoyama M, Kawata T, Yasuda M, Matsusaka S. Particle electrification and levitation in a continuous particle feed and dispersion system with vibration and external electric fields. *Adv. Powder Technol.* 2018; 29: 1960-1967
- 2) Shoyama M, Matsusaka S. Mechanism of disintegration of charged agglomerates in non-uniform electric field. *Chem. Eng. Sci.* 2019; 198: 155-164.
- 3) Shoyama M, Nishida S, Kai S, Yasuda M, Matsusaka S. Novel continuous particle mixing system using electrostatic levitation by induction charging. *Electrostatics, The 8th Asian Particle Technology Symposium, Osaka, Japan, [R9]04 (2021).*
- 4) Shoyama M, Nishida S, Kai S, Yasuda M, Choi K, Matsusaka S. A novel mixing method for levitated particles using electrostatic fields, *Adv. Powder Technol.* 2022; 33: 103812.
- 5) Shoyama M, Matsusaka S. Agglomeration and dispersion related to particle charging in electric fields, *KONA Powder Part. J.* 2021; 38: 82-93.
- 6) Camesasca M, Kaufman M, Manas-Zloczower I. Quantifying fluid mixing with the Shannon entropy, *Macromol. Theor. Simul.* 2006; 15: 595-607.
- 7) Nakata Y, Yamanoi M. Quantitative evaluation of mixed states of granular systems with Shannon entropy, *J. Soc. Powder Technol. Japan* 2007; 54: 296-304.