





The Micromeritics No.65 (2022) 3-10 DOI: 10.24611/micromeritics.2022005

電場を利用した粒子の帯電と粉体操作への応用

Charging of Particles Using Electric Field and Its Application to Powder Handling Operations

松坂 修二¹, 庄山 瑞季²

¹京都大学工学研究科化学工学専攻教授 ²同研究員

Shuji MATSUSAKA¹, Mizuki SHOYAMA²

¹ Professor, Department of Chemical Engineering, Kyoto University, JAPAN ² Researcher, Department of Chemical Engineering, Kyoto University, JAPAN

粒子の帯電は,粉体プロセスに共通する基本的な現象である。帯電した粒子は壁に付着しやすく,粒子 層が形成されると操作性や生産性が低下する。外部電場を利用すると,流体の有無にかかわらず,静電 気力によって帯電粒子を自発的に運動させられるので,粒子を効果的に除去できる。また,静電技術は, 搬送・分離・分級など,大気圧下での粉体操作に加えて,真空下でも利用できるので,宇宙開発などの 特殊な分野への応用も期待されている。本稿では,電場を用いた粒子の誘導帯電に加えて,凝集,浮揚 をはじめとする帯電粒子の挙動を解説する。応用例として,誘導帯電を基礎とする粒子の連続分散供給・ 混合法,および紫外線による光電効果を利用した粒子操作法を紹介する。

ABSTRACT

Particle charging is a typical underlying phenomenon in powder-handling processes. Charged particles rapidly deposit and accumulate on the surface, resulting in a loss of operability and productivity. The particles can be effectively removed from the surfaces using external electric fields because the electrostatic forces allow the particles to move spontaneously with or without fluid. In addition, because of its applicability to vacuum conditions, electrostatic technology has attracted attention in different fields, such as space development, in addition to powder handling under atmospheric pressure, for example, transportation, separation, and classification. This paper presents a review of the induction charging of particles in electric fields and the behavior of charged particles, including agglomeration and levitation from the particle layers. Furthermore, new applications of both the feeding and mixing of continuously dispersed charged particles are introduced. A particle-handling method based on photoemission through ultraviolet irradiation is proposed.

1 はじめに

粒子の帯電は、粉体プロセスに共通する基本的な

現象である。帯電した粒子が壁に堆積すると,操作 性や生産性が低下するので,粒子を除去するために, 流体や振動が用いられているが,外部電場を利用す れば,静電気力によって粒子を自発的に運動させら れる (Shoyama and Matsusaka, 2017)。

導電性を有する粒子に電場を印加すると、電場を 打ち消す方向に自由電子が移動する。粒子が電極に 触れると、接触面を通して電荷が移動し、粒子は電 極と同極性に帯電する。この現象は誘導帯電と呼ば れており、導体だけでなく、表面抵抗が比較的小さ い半導体や誘電体でも生じる現象である。粒子の帯 電量は外部電場の向きと大きさに依存するが、粒子 が十分な電荷を獲得したとき電極から浮揚し、電場 に沿って移動する。なお、誘電性粒子が電場中で分 極し、粒子間で双極子相互作用を受けると凝集する。

本稿では、電場中に堆積した粒子の誘導帯電、凝 集、浮揚をはじめとする一連の現象(Shoyama and Matsusaka, 2017, 2019, 2021; Shoyama et al., 2018, 2019)を解説し、その応用例として、電場と振動に より粒子を連続的に分散・供給および混合する方法 を紹介する。また、堆積粒子の帯電・浮揚法として、 今後の技術展開に期待が持てる紫外線と電場を組み 合わせた方法(Shoyama et al., 2020)を併せて紹介 する。

2 電場による粒子操作

水平に設置された平行平板電極間に静電場を印加 すると、電極上の粒子は誘導帯電したのちクーロン 力によって電極から浮揚し、対向電極に向かって移 動するが、対向電極に到達した粒子は、その電極と 同極性に帯電するので、粒子の極性は反転し、元の 電極に向かって移動する。すなわち、粒子は電極間 で往復運動を繰り返す (Cho, 1964)。導電性の高い 粒子が電極に触れると、瞬時に誘導帯電を完了する が、導電性の低下とともに誘導帯電に時間を要する ようになり、往復運動の周期も長くなる (Nader et al., 2009)。粒子の電気抵抗が極めて高い場合には、 誘導帯電は生じにくく、接触帯電だけでは電荷の移 動量が小さいので (Matsusaka et al., 2010; Matsusaka, 2011) 粒子は浮揚しない。

平行平板電極間に多数の粒子が存在する場合,粒 子の往復運動によって,正と負の帯電粒子が混在す ることになる。この中から任意の極性の粒子を取り 出すには,電極に開口部を設ける必要がある。上部 電極を平板から網状電極に変更すると,下部電極か ら浮揚した粒子は、慣性で網目を通過するが、静電 引力によって上部電極に付着すると、誘導帯電に よって極性が反転するので、現象はそれほど単純で はない。粒子操作に応用するには、装置および電場 の印加条件を工夫する必要がある。

電場を用いた粒子操作として,この他に搬送 (Matsusaka et al., 2008),分離 (Dwari et al., 2015),分 級 (Kawamoto, 2008),除去 (Mazumder et al., 2007) などの研究が行われている。また,静電技術は,流 体の有無にかかわらず利用できるので,真空下ある いは宇宙開発などの特殊な分野への応用も期待され ている。

3 電場中の粒子の凝集と浮揚

図1に示すように,誘電性粒子は外部電場中で 分極するので,双極子相互作用が顕著なときには電 気力線上に連結し,凝集粒子を形成する(Hollmann, 1950)。誘電性粒子を絶縁性の液体に分散させた ER 流体はその典型例であり,外部電場によって分極し た粒子同士が鎖状凝集粒子を形成して流体の粘度を 変化させる(Parthasarathy and Klingenberg, 1996)。

Shoyama と Matsusaka (2017) は、図2に示す平 行電極を用いて、下部電極に積層させた誘電性粒子 (ガラスビーズ、質量基準中位径:100 μm) を電場 によって気相中に浮揚させる実験を行った。

図3に示すように、電場を印加すると粒子層の 表面から単一粒子および直鎖状凝集粒子が浮揚す る。この現象は次のように説明できる。下部電極へ の電圧の印加によって粒子は誘電分極し、直鎖状凝 集粒子が形成される状態になる。また、粒子の僅か な導電性で誘導帯電が生じると、粒子は下部電極と



(a) Repulsion (b) Repulsion and attraction (c) Attraction

図1 粒子間の双極子相互作用

Fig. 1 Dipole-dipole interaction between particles.



図2 網状電極をもつ平行電極システム

Fig. 2 Parallel electrode system with mesh electrode.



- 図 3 単一粒子と凝集粒子の浮揚 (Shoyama and Matsusaka, 2017)
- Fig. 3 Levitation of single particles and chain agglomerates. Reprinted with permission from SCEJ.

同極性になり,外部電場によって上向きにクーロン 力がはたらく。粒子に作用する重力と付着力の合力 よりもクーロン力が大きくなったとき粒子は浮揚す るので,力の均衡により,単一粒子あるいは直鎖状 凝集粒子の浮揚形態が決まる。

図4に, 粒子の浮揚高さの経時変化に関する実 験結果と計算結果を示す。計算は, 粒子の帯電量を パラメータとした静電気力に重力および流体抵抗を 加えた運動方程式に基づく。静電気力の推算には, 有限要素法によって得られた電界強度が使用されて いる。同図から分かるように, 実験結果は粒子の帯





Fig. 4 Position of single particle as function of elapsed time. Reprinted with permission from SCEJ.



- 図 5 凝集粒子の比電荷と構成粒子数の関係 (Shoyama and Matsusaka, 2017)
- Fig. 5 Relationship between specific charge and number of primary particles in levitating agglomerate. Reprinted with permission from SCEJ.

電量が 0.134 pC の計算結果と良好に一致しており, パラメータフィッティングによる帯電量の推定が有 効といえる。なお,凝集粒子の浮揚では,形状係数 を考慮した流体抵抗を使用する必要がある。

図5に、パラメータフィッティングで求めた比 電荷(粒子単位質量あたりの電荷)と凝集粒子を構 成する粒子の数(構成粒子数)との関係を示す。粒 子の比電荷は,構成粒子数の増加に伴って減少する。 これは、凝集粒子を構成することによって総電荷が 増えるので、比電荷が小さくても上向きのクーロン 力が大きくなるためである。

電気抵抗が高い粒子は,誘導帯電に時間を要する ので,凝集粒子の形成後に浮揚する機会を得るが, 電気抵抗の低い粒子は,短時間で過剰な電荷を得や すく,凝集する前に単一粒子として浮揚する傾向に 集



- 図 6 電位分布と電場の向き: (a) 全体, (b) 拡大 (Shoyama and Matsusaka, 2019)
- Fig. 6 Electric potential distribution and electric field direction: (a) entire image and (b) enlarged image. Reprinted with permission from Elsevier.

ある(Shoyama et al., 2019)。また,大きい粒子ほど 単一粒子として浮揚する傾向にある。なお,浮揚を 条件とする範囲では,凝集粒子の構成粒子数に及ぼ す電界強度の影響は小さい。

4 不均一電場による凝集粒子の解砕

帯電粒子が不均一電場に入ると粒子の挙動は変化 する(Shoyama and Matsusaka, 2019)。図6(a)に、 下部平板電極と上部網状電極によって形成された電 場の電位分布と向きを実線と矢印でそれぞれ示す。 電極の構成は、図2に示したものと同じである。電 場は、電極間では一様に形成されるが、上部電極近 傍では不均一である。図6(b)の拡大図から分かる ように、網状電極の線材に向かう電場が形成されてい る。 図7(a)に、下部電極から浮揚した3個の粒子から成る直鎖状凝集粒子が、上部の網状電極を通過する様子を連続写真で示す。凝集粒子の速度は網状電極の上方で低下する。また、100 rad/sを大きく超える角速度で回転し始めると、直鎖状凝集粒子は形を変えながら、一次粒子に解砕されていく(図7(b))。回転する方向は、凝集粒子と電極の線材の位置関係で決まる。すなわち、電界が集中する方向に回転する。また、構成粒子数が多いものほど、解砕されやすい傾向にある。

凝集粒子の角速度から,構成粒子に作用する遠心 力が求められ,網状電極近傍の電場解析および粒子 の運動解析から,凝集粒子を構成する一次粒子の帯 電量が求められる。誘導帯電によって凝集粒子が得 た電荷は,電場中で生じる静電誘導によって偏り, 直鎖状凝集粒子の上部に位置する一次粒子の帯電量 が大きくなる。これに伴って,凝集粒子を構成する 各粒子にはたらくクーロン力に差が生じ,凝集粒子 が不均一電場に入ると,凝集粒子を高速で回転させ るトルクが発生する。電場中では,各構成粒子間で 分極による相互作用がはたらき,厳密にはトルクに も影響するが,その大きさはクーロン力に比べて小 さい。

回転運動により各構成粒子に生じる遠心力と同極 性の粒子間に作用するクーロン反発力の合力が,誘 電分極による粒子間相互作用力とファンデルワール ス力の合力よりも大きくなったとき,凝集粒子は一 次粒子に解砕される。

5 応用技術

5.1 分散粒子の連続供給

粉体プロセスにおいて, 粒子の連続供給と運動制 御は, 安定した操作および製品の品質管理の観点で 非常に重要である。Matsusakaら(2013)は,フィー ダー,傾斜振動板(下部電極),上部電極から成る 装置を用い,電場中で振動板との接触帯電によって 電荷を制御した粒子を振動板の下端から自由落下さ せて連続供給する方法を提案した。

Shoyama ら (2018) は、この装置を改良し、誘導 帯電により粒子を浮揚・分散させて連続供給する方 法を開発した。すなわち、上部電極を網状電極に変 更し、一方の電極を接地、他方に直流電圧を印加し



- 図7 網状電極を通過する凝集粒子: (a) 全体, (b) 拡大 (Shoyama and Matsusaka, 2019)
- Fig. 7 Agglomerate passing through mesh electrode: (a) entire images and (b) enlarged images. Reprinted with permission from Elsevier.



図 8 粒子の浮揚・分散に及ぼす印加電圧の影響(Shoyama et al., 2018) Fig. 8 Effect of applied voltage on particle levitation and dispersion. Reprinted with permission from Elsevier.

て電極間に強電場を形成させた。

図8に,誘電性粒子(アルミナ粒子,質量基準中 位径:48µm)の浮揚・分散に及ぼす印加電圧の影響 を写真で示す。下部電極から連続して浮揚する粒子 の高さは,印加電圧の増加とともに大きくなる。ま た,下部電極に電圧を印加するより,上部電極に電 圧を印加する方が、電極上方の電場を有効に利用で
きるので、粒子が浮揚して分散する範囲は広くなる。
図9(a)は、上部電極で負に帯電した粒子が、重
カとクーロン力によって降下し、下部電極と衝突を
数回繰り返すが、下部電極に付着したのち、誘導帯
電によって再び浮揚するという一連の動きを示した

集



図9 単一粒子の運動と比電荷 (Shoyama et al., 2018) Fig. 9 Motion and specific charge of particle. Reprinted with permission from Elsevier.

ものである。実験結果(実線)は、粒子の帯電量を フィッティングパラメータとする計算結果(破線)と 良好に一致している。図9(b)に、フィッティング で得られた帯電量を粒子の質量で除した比電荷の経 時変化を示す。負に帯電していた粒子は、下部電極 と衝突を繰り返す間に電荷を失い、下部電極への微 小時間(15 ms)の付着によって正の電荷を得ている。

5.2 複合電場と振動による粒子の連続混合

粉体プロセスにおける異径・異種粒子の混合は, 原料の配合だけでなく,造粒,成形,反応などの前 処理として重要である。従来,粒子の混合には機械 的撹拌が用いられてきたが,十分に混合するには多 くの時間を要するうえに,粉砕や摩擦帯電の影響で 微粒子が装置の壁に付着し,操作性および生産性の 低下を招いていた。

前節で述べた粒子の連続分散供給技術を応用する と,粒子を損傷させることなく,瞬時に空中で混合 でき,連続プロセスとして次の工程に移行できる。

図 10 (a) に, 粒子の連続分散供給装置を向かい 合わせに配置して, 異種粒子 (アルミナ粒子, 質量 基準中位径:44 µm およびマンガンフェライト粒子, 質量基準中位径:46 µm)を空中で混合させている



(a) Mixing of particles



(b) Mixing of white and black Particles

図 10 異種粒子の混合と混合後の状態

Fig. 10 Mixing of different types of particles and mixing state.



図 11 紫外線照射によって帯電した粒子の浮揚 (Shoyama et al., 2020)

状態を示す。各装置には互いに逆向きの電場が形成 されており、極性が異なる2つの粒子群が浮揚・分 散されている。各粒子群の電荷の絶対値を等しくす ると、混合後の粒子群の総電荷はゼロになる。ただ し、個々の粒子の電荷は維持されており、粒子間距 離がかなり縮まらないと静電相互作用の影響は現れ ないので、逆極性の粒子同士でも空中で凝集する確 率は低い。当然のことながら、各装置に同じ向きの 電場を印加すると、2つの粒子群は静電的に反発す るので混ざらない。図10(b)は、空中で混合した 逆極性の粒子群を基板に自然沈降させた写真であ り,瞬時にかつ十分に混合されていることが分かる。

Fig. 11 Levitation of particles charged through ultraviolet irradiation. Reprinted with permission from IEEE.

粒子径や質量が異なる異種粒子を任意の割合で混合 する場合,印加電圧によって粒子の帯電量を制御す ることになる。

5.3 紫外線と電場による粒子の帯電と浮揚

誘導帯電を利用すると、電極との接触によって粒 子の表面を十分に帯電させられるが、誘電性粒子の 場合、強い電場が必要である。その他の帯電方法と して、コロナ放電等で生成したイオンを用いる方法 も考えられるが、適切な状態で粒子を荷電するには、 放電部の構造を工夫しなければならない。交流に直 流バイアス電圧を加えた大気圧プラズマジェットを 用いると、任意の場所で、必要な量のイオンを粒子 に付与できるが、ヘリウムやアルゴンなどの希ガス が必要である (Matsusaka, 2019)。

Shoyama ら(2020)は、非接触で真空でも利用可 能な荷電法として、紫外線による光電効果に着目し た。粒子層に紫外線を照射すると、光電子を放出し て正に帯電するので、外部電場を上向きに印加すれ ば粒子は浮揚する。

図 11 に、外部電場中で粒子層(ガラスビーズ、 質量基準中位径:61 µm)に紫外線(波長:240~ 400 nm)を照射した写真を示す。400 nm 近傍の波 長を含むので、明るく照らされているが、紫外線を 照射して2s後には、上向きのクーロン力により、 多数の粒子が浮揚する様子が観察される。粒子から 放出された光電子が空間で保持されると、浮揚粒子 の運動に影響を与えることが知られているが、真空 における帯電粒子の運動制御法として、今後の技術 展開が期待される。

6 おわりに

電場中に堆積した粒子の誘導帯電,凝集,浮揚, 解砕などの一連の現象を解説し,その応用例として, 粒子の連続分散供給・混合法および紫外線と電場を 併用した光電子放出に基づく粒子操作法を紹介し た。静電技術は,固体粒子を連続して分散させるこ とが可能なため,分散,混合,積層などのプロセス を中断することなく行える。また,流体を必要とし ないので,真空中での機能性材料の創製,表面処理, クリーン化,宇宙開発などの分野においても応用で き,今後の技術展開が期待される。

References

- Cho A.Y.H., Contact charging of micron-sized particles in intense electric fields, Journal of Applied Physics, 35 (1964) 2561–2564. https://doi.org/10.1063/1.1713799
- Dwari R.K., Mohanta S.K., Rout B., Soni R.K., Reddy P.S.R., Mishra B.K., Studies on the effect of electrode plate position and feed temperature on the tribo-electrostatic separation of high ash Indian coking coal, Advanced Powder Technology, 26 (2015) 31–41.

https://doi.org/10.1016/j.apt.2014.08.001

- Hollmann H.E., Semiconductive colloidal suspensions with non-linear properties, Journal of Applied Physics, 21 (1950) 402–413. https://doi.org/10.1063/1.1699674
- Kawamoto H., Some techniques on electrostatic separation of particle size utilizing electrostatic traveling-wave field, Journal of Electrostatics, 66 (2008) 220–228. https://doi.org/10.1016/j.elstat.2008.01.002
- Matsusaka S., Control of particle tribocharging, KONA Powder and Particle Journal, 29 (2011) 27–38. https://doi.org/10.14356/kona.2011007
- Matsusaka S., Control of particle charge by atmospheric pressure plasma jet (APPJ): a review, Advanced Powder Technology, 30 (2019) 2851–2858. https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.09.023
- Matsusaka S., Yoshitani K., Tago H., Nii T., Masuda H., Iwamatsu T., Sampling of charged fine particles by motion control under AC field, Journal of the Society of Powder Technology, Japan, 45 (2008) 387–394. https://doi.org/10.4164/sptj.45.387
- Matsusaka S., Maruyama H., Matsuyama T., Ghadiri M., Triboelectric charging of powders: a review, Chemical Engineering Science, 65 (2010) 5781–5807. https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.07.005
- Matsusaka S., Iyota J., Mizutani M., Yasuda M., Characterization and control of particles triboelectrically charged by vibration and external electric field, Journal of the Society of Powder Technology, Japan, 50 (2013) 632–639. https://doi.org/10.4164/sptj.50.632
- Mazumder M.K., Sharma R., Biris A.S., Zhang J., Calle C., Zahn M., Self-cleaning transparent dust shields for protecting solar panels and other devices, Particulate Science and Technology, 25 (2007) 5–20.

https://doi.org/10.1080/02726350601146341

- Nader B.F., Castle G.S.P., Adamiak K., Effect of surface conduction on the dynamics of induction charging of particles, Journal of Electrostatics, 67 (2009) 394–399. https://doi.org/10.1016/j.elstat.2008.12.017
- Parthasarathy M., Klingenberg D.J., Electrorheology: mechanisms and models, Materials Science and Engineering, R17 (1996) 57–103.

https://doi.org/10.1016/0927-796X(96)00191-X

Shoyama M., Kawata T., Yasuda M., Matsusaka S., Particle

集

electrification and levitation in a continuous particle feed and dispersion system with vibration and external electric fields, Advanced Powder Technology, 29 (2018) 1960– 1967. https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.04.022

- Shoyama M., Matsusaka S., Electric charging of dielectric particle layers and levitation of particles in a strong electric field, Kagaku Kogaku Ronbunshu, 43 (2017) 319–326. https://doi.org/10.1252/kakoronbunshu.43.319
- Shoyama M., Matsusaka S., Mechanism of disintegration of charged agglomerates in non-uniform electric field, Chemical Engineering Science, 198 (2019) 155–164. https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.12.055
- Shoyama M., Matsusaka S., Agglomeration and dispersion related to particle charging in electric fields, KONA Powder and Particle Journal, 38 (2021) 82–93. https://doi.org/10.14356/kona.2021016
- Shoyama M., Nishida S., Matsusaka S., Quantitative analysis of agglomerates levitated from particle layers in a strong electric field, Advanced Powder Technology, 30 (2019) 2052–2058. https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.06.018
- Shoyama M., Yoshioka H., Matsusaka S., Particle charging and levitation using UV irradiation and electrostatic field, 2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (2020). https://doi.org/10.1109/ias44978.2020.9334829

者紹介



松坂 修二 Shuji MATSUSAKA

[経歴] 1983年,広島大学大学院工学研究科修士課程修了。東レエンジニアリングを経て,1989年,京都大学助手。1993年,京大博(工)。2010年,京都大学工学研究科粒子工学分野教授。 [専門] 粉体工学,エアロゾル工学,静電気工学。付着性,流動性,帯電性に関する基礎研究と関 連する応用技術の開発を一貫して行っている。 [連絡先] matsu@cheme.kyoto-u.ac.jp



庄山 瑞季 Mizuki SHOYAMA

[経歴] 2020年,京都大学大学院工学研究科博士課程修了。IHI 研究員,原子燃料工業研究員を経て, 2019年から現職。 [専門] 粉体工学,静電気工学。 最近は,微粒子の帯電現象の解明と混合,積層形成の研究に取り組んでいる。 [連絡先] mzk@cheme.kyoto-u.ac.jp