

不活性ガスを封入した粒体攪拌で発生する静電気の低減方法 — 二酸化炭素とアルゴンの比較 —

三浦 崇*¹

これまでの研究で、粒体をボトル攪拌する際に発生する静電気を低減する方法として、雰囲気気体をアルゴンガスにすることが提案されている。本研究では、着火や爆発を防ぐための不活性ガスとして広く用いられている二酸化炭素ガスについて、静電気の発生しやすいフッ素系 PFA 樹脂容器を用いた絶縁性粒体の攪拌実験を行い、静電気の発生量についてアルゴンガスと比較した。その結果、二酸化炭素ガスは窒素ガスと同等の静電気発生量であり、アルゴンガスはその 1/10 程度まで静電気を低減することが確認された。静電気を低減できる不活性ガスとしてアルゴンの優位性が示された。

キーワード: 静電気対策, 雰囲気気体, アルゴン, 二酸化炭素, PFA 樹脂

1. はじめに

近年、成形可能なフッ素系 PFA 樹脂の開発により、粒体の製造や取扱においても、これまでの金属容器・配管に代わり、容器そのものがフッ素系樹脂製であったり、配管は金属であってもライニングにフッ素系樹脂が使われるなど、PFA 樹脂の利用は高まってきている。しかし、一般に樹脂材料は絶縁性が高く、静電気が発生しやすいという欠点がある。特に粒体は、取り扱う体積や重量に対して表面積が大きくなりやすいため、相対的に大きな静電気を蓄積することになる。静電気は電気を発生させるため、粒体が付着するなどの問題を引き起こす。また、静電気が蓄積すると火花放電等が発生しやすくなるため、可燃性物質を取り扱う際には着火や爆発の危険性が増すことになる。

そのため、多くの場面で粒体の取り扱いでは静電気は発生しない方が望ましい。静電気を除去するために、加湿、接地、除電器の使用などが実施されている¹⁾。一方で、着火を防止する目的で、酸素を除去、または濃度を低下させるために雰囲気を不活性ガスに置換することが行われている¹⁾。

これまでの研究により、固体間の摩擦をアルゴンガス中で行うと、発生した静電気が直後の放電で緩和し、正味の静電気発生量が低減されることが分かっている^{2,3)}。この性質を利用したアルゴンガスによる粒体のボトル攪拌やホース輸送での静電気低減の有効性について、基礎的な実験で検証されてきた⁴⁾。

アルゴンガスは発生する静電気を低減することに加え、希ガスの特性から化学反応性の無い、つまり素材に影響がない不活性ガスとしても有用である。従来、酸化を防ぐ目的などでは不活性ガスとして窒素ガスが広く用いられているが、静電気低減の効果は見られていない³⁾。アルゴンガスはこの点で優位であると考えられる。

また、着火や火災の防止には二酸化炭素ガスが用いられる¹⁾。二酸化炭素は分子量が 44 と空気に比べて重く、

容器内に滞留させやすいといった効果が期待されているが、アルゴンの分子量も 40 とこれと近いため、同じような特性が期待できる。また、空気中のアルゴン濃度は二酸化炭素より高く、比較的入手しやすい。溶接ガスなどとしても広く使われているため、流通量も多いとよい。しかし、静電気安全指針¹⁾では、不活性ガスとして、窒素、炭酸ガス(二酸化炭素)、水蒸気、が挙げられているが、アルゴンに関しての記載がないため、引き続きアルゴンの適性についての検証を行っている。

他方、二酸化炭素ガスは不活性ガスとして広く使われているが、静電気に関する特性は知られていない。本研究では、静電気低減特性について、二酸化炭素とアルゴンを比較した。二酸化炭素と比べてアルゴンガスのより高い静電気低減特性が確認されれば、着火防止のためのアルゴンガスの応用可能性が広がることが期待できる。

2. 実験方法

攪拌の実験では、容量 1 リットルの PFA 製ボトルを使用した。中に入れる粒体試料には、静電気が発生しやすい絶縁体で着火性のないアルミナ球(直径 1 mm, および 3 mm)とソーダガラス球(直径 3 mm)を使用した。

接地したステンレス容器に粒体を入れ、そこからボトルに流し入れた。後述するが、この方法により、初期の帯電量を十分に小さくすることができる。

安定的なガス充填方法として、ボトルの底まで気体を流す管を差し込み、毎分 0.5 リットルの流量で 2 分間流入することに定めた⁴⁾。図 1 に写真で示す。ガスはすべての実験ごとに封入した。すなわち、同じガスで実験番号の異なる測定の結果は誤差や再現性を示している。

ボトルの攪拌には回転ローラー式シーソー攪拌機を用いた。直径 41.5 mm のローラーが 120 rpm で回転し、シーソー攪拌の傾斜範囲は± 3 度である。ボトルの直径が 94 mm、攪拌の回転数は約 75 rpm となる。攪拌は 120 秒間行った。

攪拌後の粒体の静電気測定法として、絶縁性粒体の静電気を測定する最も一般的な方法であるファラデーケージ法を採用し、ファラデーケージとエレクトロメー

*1 労働安全衛生総合研究所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 電気安全研究グループ 三浦崇*
E-mail: miurat@s.jniosh.johas.go.jp



図1 気体の充填方法

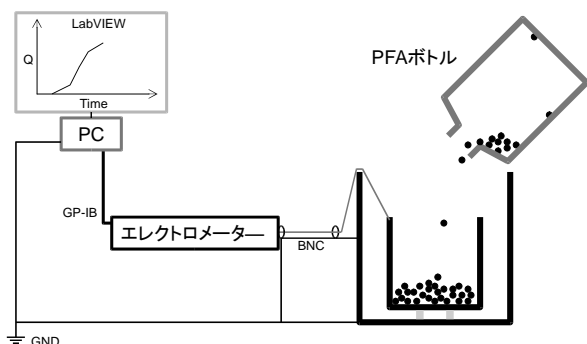


図2 粒体の帯電量測定方法

タを使用した。測定装置を図2に示す。ファラデーケージは実験に適した大きさのものを用意した。ステンレス製のカップ状の円筒容器を2重にした構造で、直径160 mm (高さ160 mm) の外側を接地し、直径100 mm (高さ100 mm) の内側のカップは底部に樹脂をはさんで電氣的に絶縁した。エレクトロメータには、(株)ADC社製8252を使用した。エレクトロメータの出力は0.1秒ごとに値を記録し、試料をファラデーケージに入れる前後も観測した。

3. 結果と考察

アルミナ球(直径1 mm) 200 gを入れてアルゴンガスを封入したPFA製ボトルの攪拌中の写真を図3に示す。粒子は攪拌中は底にたまった状態で内部で流動し、攪拌後も底にたまる様子が観察された。攪拌後に容器からア



図3 アルミナ球(直径1 mm) 200 gを入れ、アルゴンガスで封入したPFAボトルを攪拌している時の写真。



図4 アルミナ球(直径1 mm) 200 gを入れ、二酸化炭素ガスで封入したPFAボトルを攪拌している時の写真。

ルミナを取り出す際にも、粒子は流れるように取り出すことができ、ハンドリングにも問題が生じなかった。

一方、図4に示した二酸化炭素ガスを封入した試料では、粒子は攪拌開始後数秒でボトルの内壁に付着しはじめ、攪拌後も内壁に付着したままであった。帯電測定のために粒子をボトルから取り出す際も、なかなか取り出すことができず、アルゴンの場合と比べてハンドリングが非常に困難であった。

攪拌後の粒子の帯電量を測定した結果を図5に示す。試料はアルミナ球(直径1 mm) 200 gとした。実験0はボトルに入れる前のアルミナ球を直接ファラデーケージに入れて測定したものである。これは、アルミナ球の初期の電荷量(-6.8 nC)を示しており、室内空気(気温26°C, 相対湿度57%)を封入して攪拌した実験1での攪拌後の測定値(約2 μC)と比べて大きさは3桁ほど小さい。したがって、アルミナの攪拌前の初期の帯電は実験の上で問題にならないことが確認された。

アルゴンガスを封入した実験(2, 3, 6, 7)では、室内空気(実験1)や窒素ガス封入(実験4, 5)や二酸化炭素ガス封入(実験8)と比べると1桁ほど小さい。アルゴンガスの静電気低減の効果が改めて確認された。

実験室内の気温と相対湿度について、実験0から6までは26°C, 57%, 実験7と8は16°C, 38%であった。実験6と7の帯電量の違いは、実験2と3の誤差(再現性)と同程度であり、気体の封入やファラデーケージでの静電気量測定に対し、気温と相対湿度の影響は無視できると考えられる。

二酸化炭素を封入したボトルでの撹拌後の帯電量は、窒素を封入した場合とほとんど同じ結果であった。また、実験1の室内空気については静電気対策として推奨されている相対湿度（50～65%程度）と同等の比較的湿度が高い状態であったが、乾燥した窒素や二酸化炭素と帯電量はほとんど変わらなかった。これは、フッ素系 PFA 樹脂表面は疎水性であるため、加湿による静電気低減効果が小さいという可能性がある。

重量の測定から、アルミナ球（直径 1 mm）200 g は 6.3×10^4 個に相当し、総表面積を計算すると、 0.198 m^2 となる。二酸化炭素で充填した場合（図5の実験8）、アルミナの帯電密度を算出すると、 $1.2 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2$ となった。これは、一般的に知られている摩擦された絶縁体の空気中での電荷密度 10^{-5} C/m^2 に近い値である。また、二酸化炭素のコロナ開始電場⁶⁾（26.2 kV/cm）から計算した最大表面電荷密度 $2.3 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2$ と近い値である。

アルゴンのコロナ開始電場⁶⁾（7.2 kV/cm）から計算した最大表面電荷密度は $6.4 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$ であるが、実験から得られた帯電密度は 4.5×10^{-7} から $1.2 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$ と小さく、期待される静電気量よりも低い。この理由には明らかではないが、過去の研究^{3,7)}から、アルゴンでは固体間のマイクロギャップだけではなく、帯電表面を伝搬する放電が観測されており、火花やコロナとは違った形態の放電特性^{5,6)}が影響していることが考えられる。

しかし、アルミナを接地したステンレスに接触させることで帯電を初期化したときの帯電量は -6.8 nC （電荷密度 $-3.5 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$ ）であり、アルゴンによる緩和後の帯電よりも絶対値でさらに1桁小さい。したがって、アルゴンによる静電気低減にも限界があるといえる。

二酸化炭素とアルゴンを比較するため、ソーダガラスやアルミナなど、直径 3 mm の粒体についても測定を行った。その結果を図6に示す。実験室内の気温と相対湿度は気温 16°C 、相対湿度 38%であった。

ソーダガラス球 100 g を使った実験では、室内空気（ 16°C 、38%）を封入した実験1と二酸化炭素ガスを封入した実験2は帯電量がほとんど同じであり、すなわち、二酸化炭素には静電気を低減する効果はやはりなかった。一方、アルゴンガスを封入した実験3では明らかに帯電が小さく、同様の実験でアルゴンと二酸化炭素を比較した結果、アルゴンには静電気を低減する効果が確認された。

ソーダガラスを 500 g とした場合（実験4、5）についてみると、二酸化炭素を封入した場合はアルゴンの数倍になっており、やはり、アルゴンが静電気低減効果があった。100 g での実験（実験2、3）と比べると、重量が5倍になっているが、帯電量は2倍程度にとどまっている。本研究では詳しい調査には至らなかったが、この原因は、容器に接している部分で帯電が起きているが、粒体の内部では PFA との摩擦がないために帯電が起きにくい、もしくは、PFA の内壁の面積が一定であるために PFA の帯電が飽和傾向にあるため、などが考えられる。

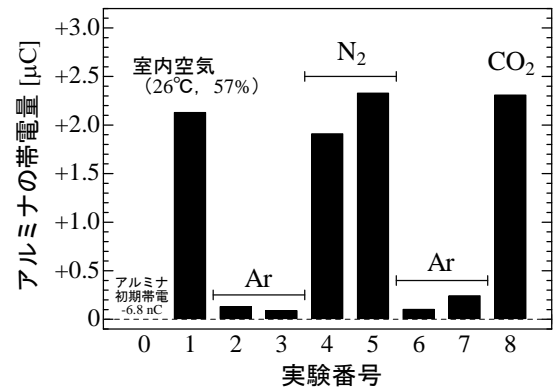


図5 PFA ボトルでのアルミナ球（直径 1 mm）200 g の撹拌における、充填ガスの種類による静電気帯電量の違い。

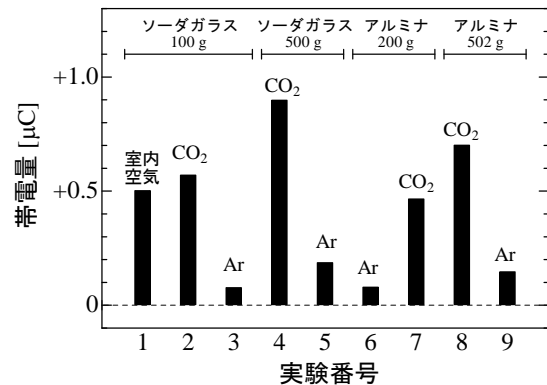


図6 各種試料（直径 3 mm）ごとの静電気帯電量の測定結果。二酸化炭素とアルゴンの比較。実験1で封入した室内空気は、気温 16°C 、相対湿度 38%である。

同様の傾向は、アルミナ 200 g（実験6、7）と 502 g（実験8、9）でも観察された。容器の大きさ、容量や内表面積、粒体の体積の関係で、重量あたりの帯電量は変化するものと考えられる。粉体の帯電量を重量あたりで検討する場合には注意が必要である。

4. まとめと今後の課題

PFA 樹脂のボトルで粒体を撹拌する実験において、静電気発生量について、室内空気、窒素ガス、二酸化炭素ガス、アルゴンガスを比べた。不活性ガスとして活用される二酸化炭素ガスについて静電気特性を調べたところ、二酸化炭素ガスは空気や窒素ガスと同等の静電気が粒体に発生し、つまり、二酸化炭素は静電気低減効果はなかった。

これに比べ、アルゴンガスは容器との摩擦による粒体の静電気を低減できることが再確認された。アルゴンガスは不活性であるため、二酸化炭素ガスのような着火防止特性⁸⁾も兼ね備えることができる可能性がある。

アルゴンガスで静電気が低減する原因は、コロナ放電が発生しやすいためと考えられる。ただし、アルゴンを使用しても原理的に放電が発生しない程度の帯電量は残留するため、低減には限界があると言える。

また、アルゴンの静電気低減効果の大きさは、おそらく、粉体の種類と粒径、重量、容器や壁面の材質、輸送速度などの条件に依存する可能性があるため、静電気低減の実施にあたっては、実際に比電荷などを測定し、その効果を評価して検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 労働安全衛生総合研究所. 静電気安全指針 2007. JNIOOSH-TR-No.42. 2007.
- 2) Miura T. Observation of charge separation and gas discharge during sliding friction between metals and insulators. *Journal of Physics: Conference Series*. 2015; 646: 012057.
- 3) 三浦崇. アルゴン中でのマイクロギャップ放電による摩擦帯電緩和の効率. *静電気学会誌*. 2019; 43: 8-12.
- 4) 三浦崇. アルゴンガスによるボトル攪拌とホース搬送での静電気の低減. *静電気学会誌*. 2021; 45: 75-80.
- 5) Lowell J and Rose-Innes AC. Contact Electrification. *Adv. Phys.* 1980; 29: 947-1023.
- 6) 電離気体論. 第 27 版. 電気学会. 1997.
- 7) 三浦崇, 榎戸一樹, 廣川紀子, 荒川一郎. N₂, Ar, Kr ガス中のダイヤモンドと水晶のすべり摩擦における気体放電. *真空*. 2003; 46: 210-213
- 8) NFPA 77 Recommended Practice on Static Electricity 2019 Edition, National Fire Protection Association. 2019.