

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

三浦 崇^{*,1}

(2020年9月8日受付; 2020年11月6日受理)

Reduction of Static Electricity Generated by Bottle Mixing and Tube Transportation in Argon Ambience

Takashi MIURA^{*,1}

(Received September 8, 2020; Accepted November 6, 2020)

Influence of gas ambience on tribo-electrification was investigated. Generating charge of alumina and stainless steel ball specimens of a few mm diameter after bottle mixing and tube transportation filled with argon, nitrogen, dry air, and humid room air was measured by means of a Faraday cage and an electrometer. Argon gas affects to reduce the electrification in comparison with dry air and nitrogen. The charge reduction effect of argon was verified in experiments of a fluorocarbon polymer bottle and tube.

1. はじめに

気体雰囲気制御した固体間のすべり摩擦による静電気の研究によると、気体雰囲気摩擦したときに発生する静電気の電荷量は、真空中での電気量よりも小さい¹⁾。これは、気体中では接点近傍で表面帯電が原因となったマイクロギャップ放電、つまり、自己放電による帯電緩和が起きるためである²⁾。電荷分離量から放電量を差し引いたものを一般的に静電気といっている。自己放電が活発であれば、静電気は低減されることになる。

真空中での分離電荷量に対する気体中での帯電電荷量を残留率と定義する。ピンオンディスク摩擦実験により、ピンにステンレスなどの金属を使用し、ピンの電荷量をエレクトロメータで測定し、真空中と気体中で帯電を比較することから、残留率の気体依存性を調べてきた。ステンレスとPET樹脂の摩擦では、室内空気での残留率は20-50%程度であった³⁾。また、1気圧の乾燥空気や窒素では残留率は30-40%程度であった²⁾。一般的に大気中での残留率は20-50%と推測できる。

ステンレスと融解石英の摩擦による実験⁴⁾でも、窒素1気圧では約32%、乾燥空気1気圧では約40%であった。

しかし、アルゴン1気圧では、マイクロギャップ放電による緩和が大きく、残留率は1%以下になることが明らかになった。また、0.4気圧下では、乾燥空気と窒素でも残留率はそれぞれ約0.9%と4.4%以下と小さくなった。気圧が下がることで、放電が活発になったためと考えられている。

窒素とアルゴンの混合ガスの場合には、アルゴン分圧が高いほど残留率は低下した⁵⁾。また、ネオンでも帯電緩和が大きいことが観測されたことから、コロナ放電開始電場が小さい希ガスでは自己放電による帯電緩和効果が大きいのではないかと推測された。

帯電緩和効果の実証の一例としてペットボトルにアルミナ球と気体を封入した実験では、アルゴンではアルミナの帯電が緩和されているような振る舞いが観測された⁵⁾。摩擦発光の観測⁶⁾により、接点近傍でのマイクロギャップ放電の発生が明らかになっているため、ここでも自己放電による帯電緩和が起きていると考えられた。しかし、絶縁体試料の摩擦静電気量測定による低減効果の有無は確認されていない。

本研究では、絶縁体容器と絶縁体試料、および金属試料を摩擦し、ファラデーケージで試料の帯電量を測定し、気体による緩和の大きさを比較した。

キーワード: アルゴン, 帯電緩和, フッ素樹脂, アルミナ, ステンレス

* 労働安全衛生総合研究所

(〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6)

Electrical Safety Research Group, National Institute of Occupational Safety and Health, 1-4-6 Umezono, Kiyose-shi, Tokyo 204-0024, Japan

¹ miurat@s.jniosh.johas.go.jp

2. 静電気量の測定方法

絶縁体や金属の球状試料の静電気測定法として、ファラデーケージとエレクトロメータを使用した。図1に概略図を示す。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

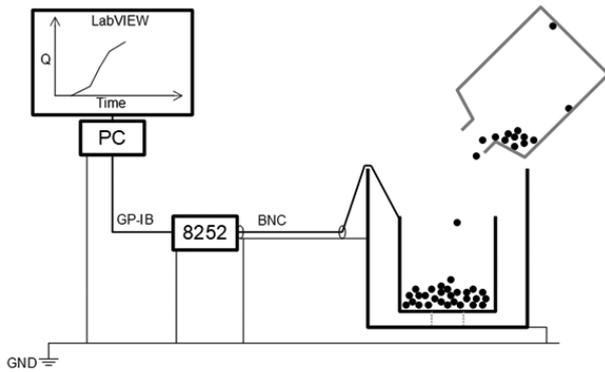


図1 静電気量の測定方法
Fig.1 Method of charge measurement.

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。実験によって測定可能レンジは 100 nC または 10 μ C とした。測定器内部の電荷を捕集するコンデンサの容量は測定レンジごとに異なり、100 nC レンジでは 10 nF、10 μ C では 1 μ F となっている。マルチメーターで測定した入力ケーブル (4 m) を含むファラデーケージの静電容量は 0.4 nF であったため、100 nC レンジでは 5% 程度の取り込み不足は考えられるが、10 μ C レンジでは影響は無視できる。

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. 実験と結果

本研究では 3 種類の実験を行った。第 1 実験は、過去に報告したペットボトルにアルミナ球とアルゴンを封入して攪拌した場合に内壁面に付着しなかった観測結果⁵⁾ について詳しく調べるため、攪拌方法を定めた上でアルミナの帯電量を測定し、静電気の低減を確認するために行った。

第 2 実験は、PFA 樹脂容器でのアルゴンの効果を確認するために行った。PFA は FTFE に代表されるフッ素樹脂の中でも熔融成形できる熱可塑性樹脂としての特性があり、近年、容器の成形やコーティングなどで用いられている。しかし、フッ素樹脂は電気絶縁性が高いため静電気を保持しやすく、静電気問題が発生しやすい材料として知られている。PFA 製のボトルを用いて、第 1 実験と同様に行った。

第 3 実験は、第 1, 2 実験と異なり、試料と気体を完全に封じ込めることができないホース搬送に対し、アルゴンを一定の流量で導入し続けることによる試料の静電

気低減効果を確認する目的で行った。球体試料が PFA ホース内を自重で落下し、転がり摩擦による試料の帯電量を測定した。

3.1 ペットボトル攪拌での測定 (第1実験)

3.1.1 実験方法

水で洗浄して内部をよく乾燥したペットボトル (0.5 リットル) を攪拌容器とした。

固体試料として、アルミナとステンレスを使用した。アルミナ球 (直径 1 mm) での実験では 200 g をボトルに入れた。817 個を抽出して計量したところ 2.60 g であったことから、ボトルに入れた個数は約 6.3×10^4 個と推測された。ステンレス球 (直径 1/16 インチ) の実験では 500 個をボトルに入れ、重量は 8.57 g であった。接地したステンレス製容器に入れた試料を接地したステンレス製ロートを通じてボトルに入れた。この方法でアルミナをファラデーケージに直接入れて初期の帯電を測定したところ、-16 nC 程度であった。

ペットボトルに試料を入れ、加えて試料気体を十分に置換するように導入し、封入した。

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 66.5 mm より、攪拌の回転数は約 75 rpm となる。

攪拌後、直ちにファラデーケージに試料を移し入れ、静電気量を測定した。

3.1.2 実験結果

攪拌直後の様子を図 2 に示す。図 (a) に示した乾燥空気で封入した場合、攪拌を開始して数十秒後にはアルミナが内面に張り付いて動かず、さらに内側にあるアルミナが内部で攪拌している様子であった。図 (b) に示したアルゴンの場合には、内面への張り付きはなく、底部でスライドしながら攪拌されている様子であった。

一連の実験結果を図 3 に示す。横軸は実験の順番を示しており、使用した気体種はグラフ内に示した。室内空気を充填した実験について、図 3 (a) アルミナでは気温 18.5°C、相対湿度 18%、図 3 (b) ステンレスでは 16.5°C、23% であった。室内空気や乾燥空気を充填した場合と比べ、アルゴンでは取り出した試料の帯電量は小さくなった。

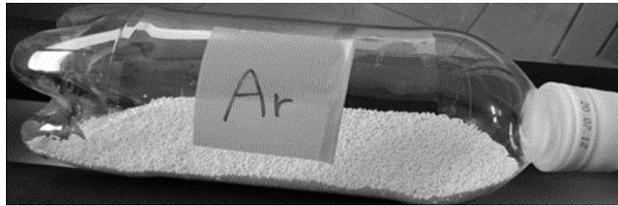
3.2 PFA ボトル攪拌での測定 (第2実験)

3.2.1 実験方法

容量 1 リットルの PFA 製ボトルを使用した。固体試料はアルミナ球 (直径 1 mm, 200 g) とステンレス球 (直径 1/16 インチ, 約 1000 個 (17.1 g)) を使用した。第 1



(a) Alumina balls saturated with dry air



(b) Alumina balls saturated with argon gas



(c) Stainless steel balls saturated with dry air

図2 ペットボトルに試料と気体を封入して攪拌した直後の様子。

Fig.2 Photographs after stirring the PET bottle including a ball specimen saturated with a gas.

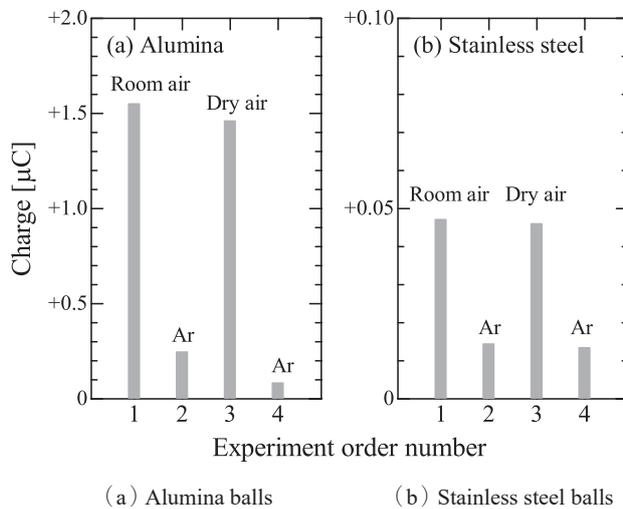


図3 気体による帯電量の違い

Fig.3 Difference of charge in several gas ambience.

実験と同様の方法で試料をボトルに入れた。アルミナの初期の帯電量は、 -6.8 nC 程度であった。

定量的にガスを充填する方法として、図4で示すように、ボトルの底から毎分0.5リットルの流量で2分間流入することに定めた。

攪拌方法は第1実験と同様であるが、ボトルの直径94

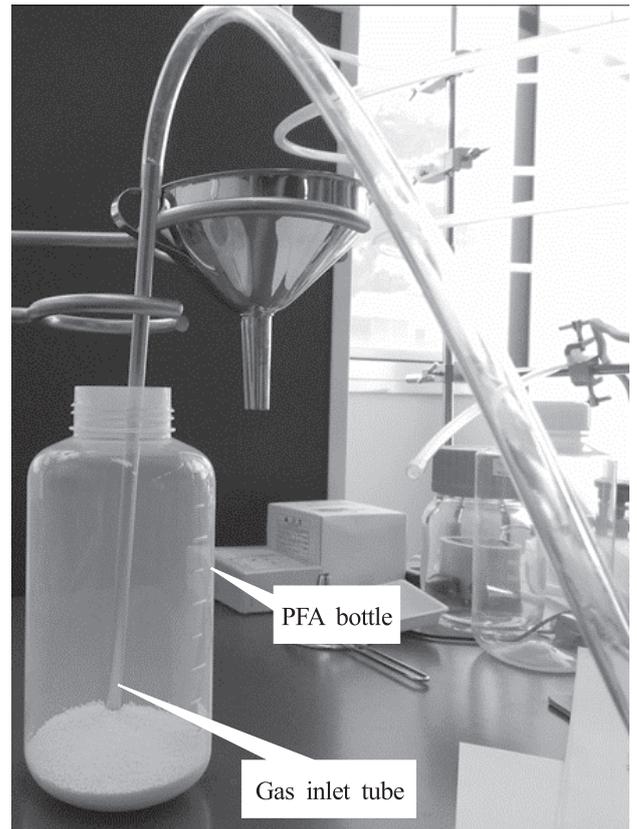


図4 ガスの充填方法

Fig.4 Method of gas filling.

mm から計算すると、ボトルの回転数は約53 rpm であった。ボトルの帯電状態を制御することはできなかったが、攪拌中でも空の状態でも外部表面の電位は -1 kV から -3 kV の範囲であった。

3.2.2 実験結果

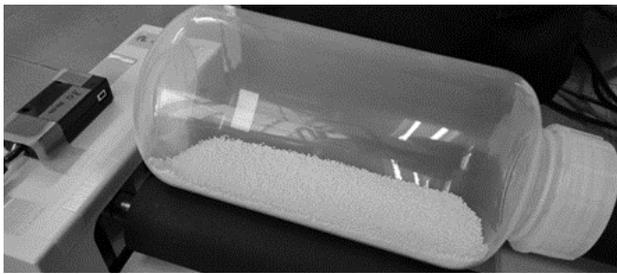
図5に攪拌後の様子を示す。図5(a)に示した窒素を充填した場合には、試料が静電気により内壁に強く付着し、電荷量測定の際にアルミナの8%ほどが全く取り出せないこともあった。(b)に示したアルゴンの場合は試料が付着することなく、全てをファラデーケージに投入できた。

攪拌後の帯電量について、アルミナでの実験結果を図6に示す。室内空気は 26°C 、60%であった。比較的湿度の高い空気であっても、窒素と同程度の帯電量が観測された。アルゴンの場合には、その1/10程度の帯電量となった。

ステンレスでの実験結果を図7に示す。室内空気は 26°C 、57%であった。実験番号1では、攪拌することなしに取り出した時の帯電量を示している。PFA ボトルと接触しただけでステンレスは正に帯電した。実験番号2以降は攪拌後の測定結果である。アルミナでの実験と同様に湿度のある空気と窒素は同程度の帯電であったが、アルゴンではそれらよりも小さくなった。



(a) Alumina filled with nitrogen gas



(b) Alumina filled with argon gas

図5 攪拌後の様子
Fig.5 Photographs after bottle mixing.

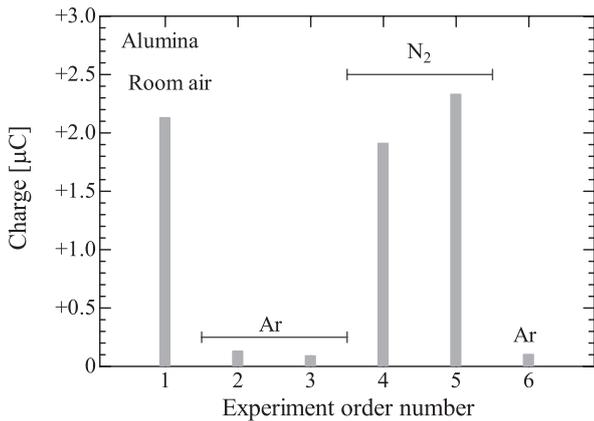


図6 アルミナ試料の帯電量
Fig.6 Mass charge density of alumina specimen.

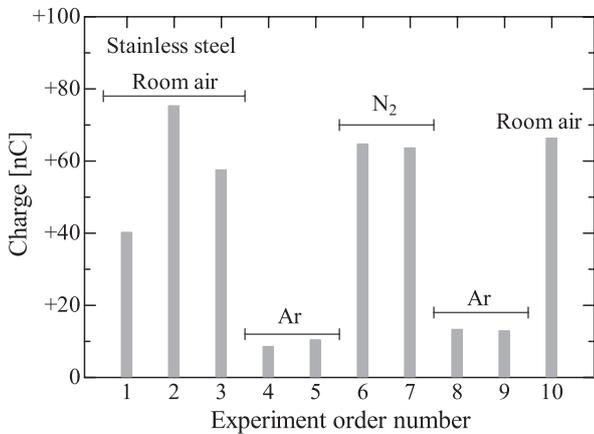


図7 ステンレス試料の帯電量 (実験番号1は攪拌なし)
Fig.7 Mass charge density of stainless steel specimen. Note that the experiment 1 was without mixing.

3.3 PFAホースによる搬送での測定 (第3実験)

3.3.1 実験方法

図8に実験装置を示す。PFAホースは内径8mm, 外径10mm, 長さ10m (容積0.50リットル)を用いて, 上下方向にらせん状に設置した。上部にT形配管 (接地電位) を設置し, 球状試料は鉛直上から落とし入れ, 気体は横から一定の流量で導入した。試料投入口は塞いでおき, 試料を入れるときだけ開けた。

試料はステンレス球 (直径3mm) とアルミナ (直径3mm) を使用した。どちらの試料も一度に20個を上部から投入した。球体試料は, 接地した金属部分に接触してからPFAホースに入るようにした。アルミナの初期帯電は-73pC程度であった。試料は重力によってホース内を転がりながら落下し, ホースを出た試料はファラデーケージに直接入るようにした。ホース内を転がる時間は, ステンレスが約5.9秒, アルミナが約6.9秒程度であった。

湿気のある室内空気 (23°C, 52%) での実験では, 気体は導入せずに転がり摩擦後の電荷量をファラデーケージで測定した。

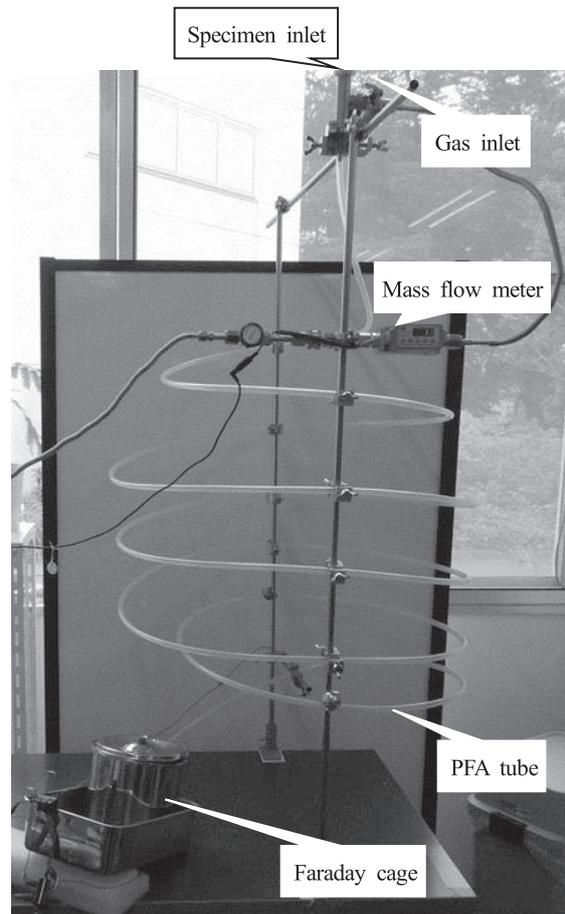


図8 実験装置
Fig.8 Experimental setup.

導入する気体の流量はマスフローメーターで測定し、バルブによって流量を毎分 0.5 リットルに調整した。気体の通過時間は 60 秒程度であり、試料の搬送には影響していないと考えられる。実験は気体導入開始 2 分後から行い、その後の測定値は標準偏差 $\pm 15\%$ 以下で安定していた。

3.3.2 実験結果

図 9 に試料の帯電量の測定結果を示す。ステンレスについて、室内空気 (実験番号 1) では気体の導入なしに実験した。次にアルゴン (実験番号 2) を導入すると、帯電量はやや上がった。次に窒素を流入した場合、帯電量は倍増した。次の乾燥空気でも同程度であった。

続けて、乾燥空気でもアルミナで実験したところ、約 13 nC 帯電したが、再びアルゴンを流入してステンレスとアルミナで実験したところ、それぞれ帯電量は低くなり、窒素や乾燥空気の場合と比べて半分以下となった。

以上のように、搬送ホースにアルゴンを流入した場合にも、窒素や乾燥空気と比べ、帯電量は小さくなった。

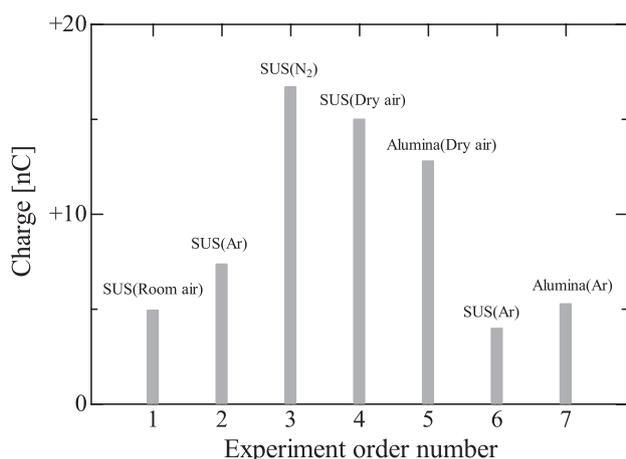


図 9 試料の帯電量 (実験番号 1 はガス導入なし)
Fig.9 Charge of specimens. Note that the experiment 1 was without gas flow.

4. 考察

いずれの実験においても、アルゴンガスによって固体試料の静電気が緩和されることが明らかになった。これまでの研究結果と同様に、アルゴンではマイクロギャップ放電が起きやすいためではないかと考えられる。

攪拌実験では、乾燥空気や窒素と比較したアルゴンの静電気低減率はステンレスよりもアルミナの方が大きかった。マイクロギャップ放電の発生のしやすさが影響していると考えられる。電荷密度が高い、すなわち電場が大きなところで放電は発生するため、絶縁性の高いアルミナでマイクロギャップ放電が起きやすい可能性がある。

粉体の表面電荷密度で考察する。第 2 実験において、アルミナ球の総表面積から表面電荷密度を計算すると、窒素で充填した場合 (図 6 実験番号 5) では、 1.2×10^5 C/m² となった。一般的に知られている絶縁体の空気中での電荷密度 10^5 C/m² 程度⁷⁾ とも近い。また、窒素のコロナ開始電場 (38.0 kV/cm)^{8,9)} から計算した最大電荷密度 ($\sigma = \epsilon E$) は 3.4×10^5 C/m² となり、実験結果と近い。

アルゴン (図 6 実験番号 3) では 4.6×10^7 C/m² となった。アルゴンのコロナ開始電場 (7.2 kV/cm)^{8,9)} から計算した最大電荷密度は 6.4×10^6 C/m² となるが、これと比べて実験結果はさらに 1 桁ほど小さい。期待される値よりも静電気が低減される理由は明らかではない。過去の研究から、放電発光がマイクロギャップ間だけではなく、帯電表面に沿ったものも観測されている⁵⁾ ことから、典型的な火花やコロナとは違った形態の放電特性や暗流段階での放電特性が影響している可能性もある。

アルミナの初期帯電は -3.5×10^8 C/m² となった。符号の違いは接触の相手がステンレスであるためと考えられるが、大きさで比較しても、先述したアルゴンでの測定値 (4.6×10^7 C/m²) よりさらに 1 桁小さい。アルゴンを使用しても、摩擦によって発生した電荷量の一部がマイクロギャップ放電後も残留すると考えられ、アルゴンによる静電気低減にも限界があることが分かった。

第 2 実験において、ステンレスでは室内空気中 (図 7 実験番号 2) で 9.5×10^6 C/m² となった。アルゴン (図 7 実験番号 4) では 1.3×10^6 C/m² となった。

また、攪拌実験の場合、帯電したアルミナ試料をファラデーケージに投入する際、窒素や空気では、試料がボトル内壁に付着するため、全てを落とし切るまでに 10 秒以上かかったが、アルゴンの場合には容器を傾けるだけで 2 秒以下で落とし切ることができた。アルゴンは試料のハンドリングの改善にも効果が期待できる。

第 3 実験では、窒素や乾燥空気での帯電量と比べ、アルゴンでは帯電は低くなっているが、低減率は 1/3~1/2 ほどである。また、理由は不明であるが、アルゴンを導入する前の室内空気での実験の方が帯電量が低い結果にもなった。再度アルゴンで実験した際は室内空気より帯電は低くなったが、アルゴンが他と比較して圧倒的に静電気を低減できるとは言いがたい。考えられる原因としては、摩擦速度が速いということである。ステンレス球は平均速度 1.7 m/s、アルミナ球は 1.5 m/s であり、これは攪拌装置での平均速度 0.26 m/s よりも大幅に速いため、摩擦帯電の速度依存性の解釈で考察される逆流現象⁷⁾ (Back-conduction や Back-flow) の影響に差がある可能性がある。また、攪拌では粉体と内壁は繰り返し接触す

るため、帯電と放電の平衡に達しやすいが、ホース内の搬送のように再接触がない場合には、常に新しい接触面が現れ、帯電よりも放電緩和の寄与が相対的に小さくなるため、などが考えられる。

電荷密度を計算してみると、窒素導入でのステンレスが $3.0 \times 10^5 \text{ C/m}^2$ 、乾燥空気導入でのアルミナが $2.3 \times 10^5 \text{ C/m}^2$ となった。先述の窒素のコロナ開始電場^{8,9)}からの計算値 $3.4 \times 10^5 \text{ C/m}^2$ や絶縁体の空気中での電荷密度 10^5 C/m^2 程度⁷⁾とも近い。また、アルゴン導入でのステンレスが $1.3 \times 10^5 \text{ C/m}^2$ 、アルミナが $7.1 \times 10^6 \text{ C/m}^2$ となった。これらも、先述のコロナ開始電場^{8,9)}からの計算値 $6.4 \times 10^6 \text{ C/m}^2$ と近い値となり、妥当性のある帯電の大きさといえる。しかし、攪拌とは異なり、アルゴンでのアルミナの帯電量は大幅には減少しなかった。

粉体の帯電について、特に絶縁性 (抵抗率 $>10^{10} \Omega\text{m}$) の粒径 1 mm 以上の粉体の充填では、粉体の質量あたりの帯電量 (質量比電荷、または単に比電荷、Mass charge density、便宜的に使われる物性量) が $1 \mu\text{C/kg}$ 以上ではコーン放電 (Bulking brush discharge, Cone discharge) が発生しやすくなるとされている^{10,11)}。これを防止するためには、充填流量を下げるか、粉体の除電が必要である。アルミナ試料での実験結果について比電荷を計算してみると、攪拌の場合、図3(a)実験番号4では $0.42 \mu\text{C/kg}$ 、図6実験番号3では $0.45 \mu\text{C/kg}$ となった。アルゴンを充填して粉体を取り扱うことで、比電荷を $1 \mu\text{C/kg}$ 以下に低減できる可能性がある。しかし、搬送の場合には、図9実験番号7から計算した $4.6 \mu\text{C/kg}$ 程度までしか低減できていない。アルゴンの静電気低減効果の大きさは、攪拌にしても流動にしても、粉体の大きさ、粉体が空間を占める割合、などの様々な条件によって変動すると思われるため、実際のプロセスにおいて比電荷を測定し、アルゴンによる低減効果の大きさを確認する必要があると思われる。

5. まとめ

アルゴンガスでボトルやホースを充填した場合、窒素と比べて樹脂容器との摩擦による静電気を低減できるこ

とが明らかになった。ボトルでの攪拌実験では、アルゴンガスを使用することでアルミナ球のボトル内面への静電気による付着も低減できた。アルゴンは試料のハンドリングにも効果が期待できる。しかし、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。

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、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高く、実際に比電荷などを測定して評価する必要がある。

参考文献

- 1) 三浦 崇：高真空下での静電気現象. 静電気学会誌, **43** (2019) 8-12
- 2) 三浦 崇：金属と絶縁体の摩擦による電荷分離とマイクロギャップ放電による帯電緩和効果の測定. Journal of the Vacuum Society of Japan, **57** (2014) 167-170
- 3) 三浦 崇, 山隈瑞樹：静電気による労働災害防止のための金属と樹脂固体の摩擦帯電量測定. 労働安全衛生研究, **6** (2013) 59-66
- 4) T. Miura: Observation of charge separation and gas discharge during sliding friction between metals and insulators. J. Phys. Conf. Seri., **646** (2015) 012057
- 5) 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, **43** (2019) 8-12
- 6) 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, **46** (2003) 210-213
- 7) J. Lowell and A. C. Rose-Innes: Contact Electrification. Adv. Phys., **29** (1980) 947-1023
- 8) J. M. Meek and J. D. Craggs: Electrical Breakdown of gases, Oxford, London (1953)
- 9) 電離気体論, 第27版, 電気学会 (1997)
- 10) NFPA 77 Recommended Practice on Static Electricity 2019 Edition, National Fire Protection Association
- 11) 静電気安全指針2007. 労働安全衛生総合研究所技術指針, ISSN 1882-2703