

減圧 (1~0.02 気圧) による摩擦帯電の低減現象について

三浦 崇*1

これまでの研究で、雰囲気気圧を大気圧の 1/10 程度まで低下させるとマイクロギャップ放電が促進されて正味の帯電量が減少することが知られている。本研究ではこの現象を応用し、ガラス管内を減圧することで粒子が管内を移動した後の帯電がどの程度減少するかを調べた。アルミナ粒子の場合、ガラス管内に封入した空気を減圧するほど帯電量は減少する傾向が見られ、大気圧下で最も帯電量が高かった乾燥空気の場合、大気圧での帯電量に比べて 0.02 気圧ではおよそ 25% 程度まで減少した。ステンレス粒子の場合でもアルミナと類似した傾向が見られたが、ソーダライムガラスの場合はそれらとは異なり、減圧するほど帯電量が増す現象も観測され、注意が必要である。

キーワード: 減圧, 静電気対策, ガラス配管, マイクロギャップ放電, 絶縁性粒子

1. はじめに

粒子の製造や取り扱いにおいて、以前より容器や配管のライニングとしてガラスが広く使われている。しかし、一般にガラスは絶縁性が高いため電荷を溜め込みやすく、静電気の発生が著しいという欠点がある。特に、粒子は取り扱う体積(質量)に対して表面積が大きくなるため、相対的に大きな静電気を蓄積するため、その影響は大きくなる。また、静電気は電気力を発生するため、粒子が付着するなどのハンドリングの不具合を引き起こしやすい。つまり、粒子の取り扱いでは多くの場合で静電気が発生しない方が望ましいと考えられる。

これまでの基礎的な研究により、減圧(気圧を大気圧以下にすること)した窒素や乾燥空気中で金属と絶縁体を摩擦すると、発生した静電気は接触点付近で放電(マイクロギャップ放電)し、この緩和効果によって、大気中での静電気発生量よりも帯電は低減されることが分かっている^{1,2)}。

予備の実験として、真空引きによる帯電緩和現象を観察した。実験装置の系統図を図 1(a)に示す。アルミナ球(直径 1 mm)を真空引き可能なガラス容器(ホウケイ酸ガラス, Duran®, 内径 16 mm, 長さ 120 mm)に入れて、内部が大気圧(気温 18.5°C, 相対湿度 34%; ロトロニック社製 ハイグロフレックス HF534 で測定, 以下同じ)の時に攪拌した。その結果、摩擦によって静電気が発生し、図 1(b)の写真で示すように、いくつかのアルミナ粒子は揺らしても落ちない程度にガラス管の内壁に付着した。次に、スクロール真空ポンプで容器内の空気を抜くと、減圧中に粒子は自重で落下した。落下後の写真を図 1(c)に示す。これは、減圧したことで、ガラス面と粒子間や粒子表面間でマイクロギャップ放電が起き、電荷の中和によって帯電が緩和されたのではないかと考えられる。

この研究を開始するにあたり、まずは、金属試料を代表してステンレス粒子、帯電しやすいアルミナ粒子、配

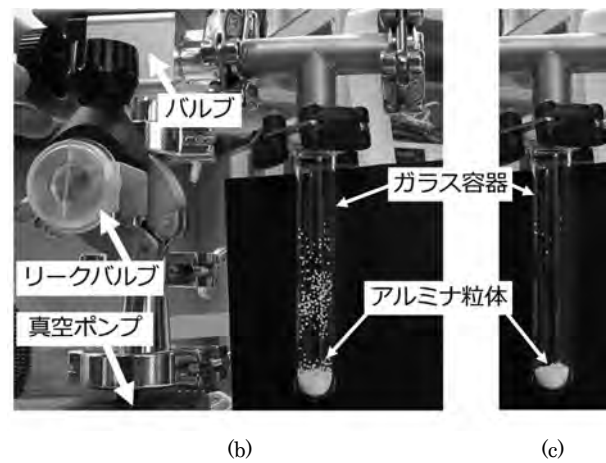
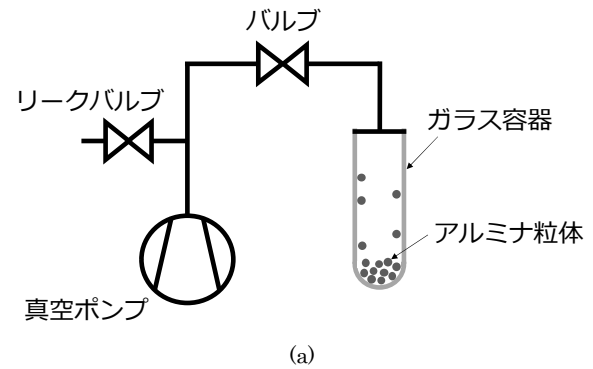


図 1 真空引きによる帯電緩和現象の観察。(a) 実験装置の系統図。(b) 実験装置の写真とガラス容器内が大気圧の時に真空引きの前で。 (c) 減圧中に内部のアルミナ粒子が落下した直後の写真。

管とは異なるガラス材料としてソーダライムガラス粒子を対象として、ガラス管内でのすべりや転がりが発生する摩擦帯電を低減するために有効な真空度について調査するため、気体圧力を制御してガラス管内を移動した後の粒子の帯電量を測定した。

2. 実験方法

粒子試料の摩擦後の帯電量を測定するため、特殊な真

*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*1
E-mail: miurat@s.jniosh.johas.go.jp

空容器を作製した。実験装置の模式図を図 2(a)に示す。ガラス管 (内径 16 mm, 長さ 500 mm) はホウケイ酸ガラス (Duran®) でできており, 内部を真空にしても大気圧に耐える性能がある。管は真空配管の規格を満たしており, T 管やバルブなどの NW16 フランジを有する真空部品や容器が接続可能である。

図 2(a)に示すように, ガラス管の両端に L 配管と T 配管をそれぞれ接続して金属容器とした。L 配管を接地に接続し, 粒体試料を溜めておき, T 配管の方にエレクトロメータの入力端子を接続した。L 配管からガラス管を通じて T 配管に入ることによって, ガラスとの摩擦によって発生した粒体の帯電量をエレクトロメータで測定する仕組みである。

粒体試料には, 可燃性のないものとし, 装置内部をスムーズに流れさせることができる球状とした。研究のとりかかりとして比較的入手することが容易であった, 直径 3 mm のステンレス球, 直径 1 mm のアルミナ球, 直径 1 mm のソーダライムガラス球の 3 種類を使用した。

ガラス管内に封入する気体が室内空気の場合は, 本研究では現実の場面を想定し, 機械的に制御することはしなかった。よって, 測定日 (季節) が異なると変化し, (15°C, 49%), (27°C, 59%), (17°C, 62%), (27°C, 59%) と様々であった。気体は 1 回の測定実験ごとに大気圧で封入し, 減圧したものを使用した。具体的には, 気圧補正型のカプセルダイヤルゲージ真空計 (Edwards 社製 CG16K) で気体圧力をモニターしながら, ガラス管内をオイルフリーのスクロールポンプで真空引きし, 目的の圧力で真空バルブを封じて測定前の準備とした。乾燥空気を封入した実験については, 気体をガスボンベから供給することで実施した。

図 2(b)の写真で示すように, この真空容器を T 配管部分を回転できる軸に固定して設置する。L 配管側を水平よりも下げて粒体試料を L 配管側にためておく。エレクトロメータ (ADCMT 社製 8252) で電荷測定を開始し, 接地した L 配管側を上を持ち上げて, 粒体試料をおよそ 40 度の傾斜で自然にすべり落とす。粒体試料がすべて T 配管側に移動すると, 摩擦帯電の電荷が測定でき, 一連の実験が終了する。

エレクトロメータで測定された電荷量の測定結果の一例を図 3 に示す。この時のガラス管内は室内空気 (気温 14.8°C, 相対湿度 48.8%) であり, 圧力は 0.02 気圧で設定した。粒体試料は直径 1 mm のアルミナ粒体で, 15 g を封入した。アルミナ粒体がガラス管内をすべり降りて, 経過時間 8.2 秒付近から電荷量測定側に入り始め, 9 秒付近で T 配管の電荷量測定容器にすべて入ると, エレクトロメータの計測値は正に増加した。これは, アルミナ粒体がガラス管の内壁とのすべり摩擦によって, 正の電気に帯電したことを示している。飽和した数値を帯電量の測定値とした。

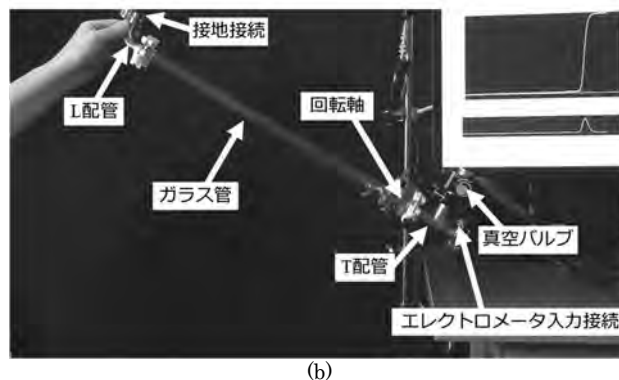
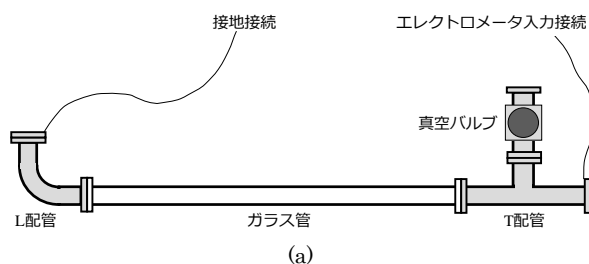


図 2 ガラス管内におけるアルミナの摩擦帯電の測定装置。(a) 装置の模式図。(b) 実験中の写真。

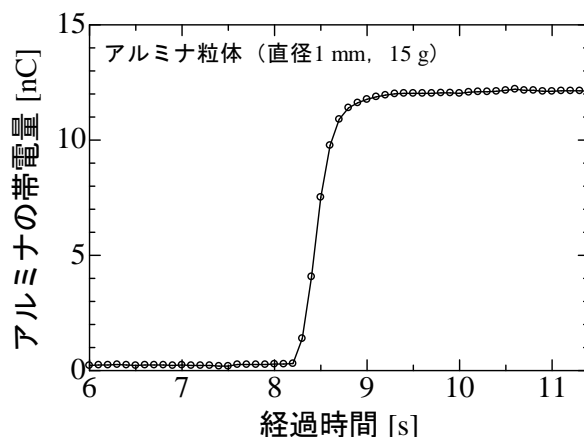


図 3 アルミナ粒体の帯電量の測定

3. 結果と考察

図 4 にステンレス粒体の帯電量の容器内圧力依存性を示す。全体的には, 圧力が低いほど帯電量は減少した。この原因については, ステンレス粒体がガラス管の内表面との摩擦で帯電しながらも, それと同時にマイクロギャップ放電や連鎖的な表面放電等も発生し, つまり, 摩擦帯電で発生した電荷の一部が中和していることがこれまでの研究²⁾から推測できるが, この時, より放電が起きやすい低い気圧では, 大気圧中よりも中和が促進され, 正味の帯電量が減少しているのではないかと考えられる⁵⁾。

また, 図 5 での 1 気圧 ($= 1 \times 10^5$ Pa) での測定値から, 気体の湿度の違いによって, 1 気圧でのステンレスの帯

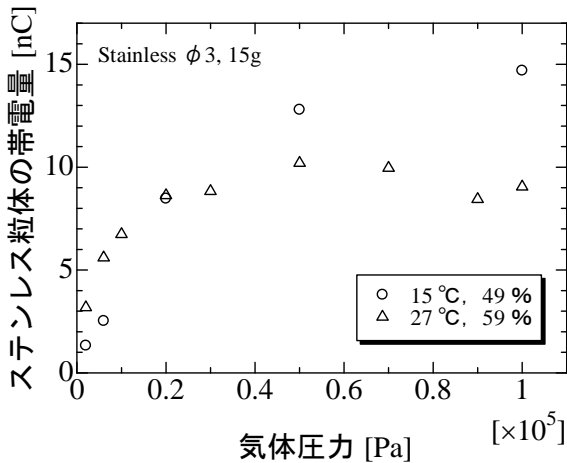


図4 ガラス管内でのステンレスの摩擦帯電の空気圧力依存性

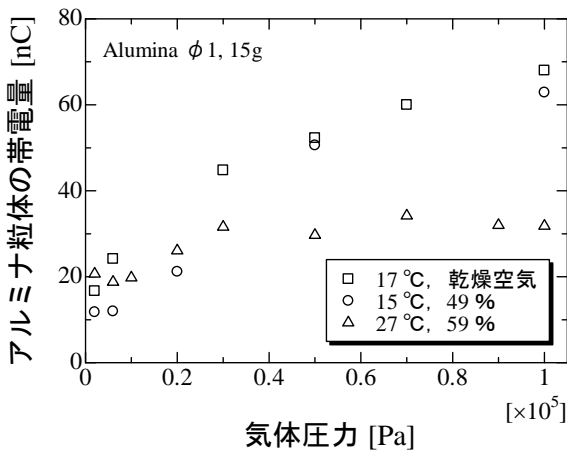


図5 ガラス管内でのアルミナの摩擦帯電の空気圧力依存性

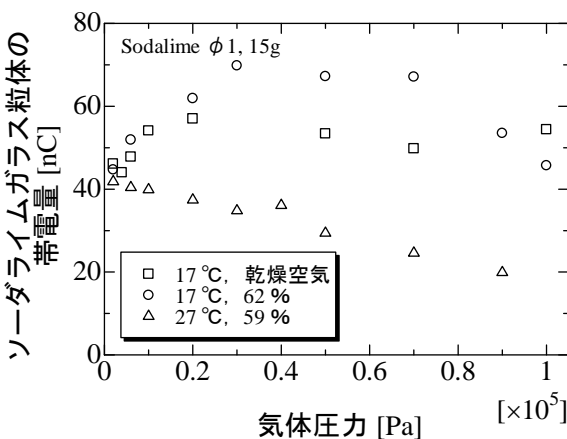


図6 ガラス管内でのソーダライムガラスの摩擦帯電の空気圧力依存性

電量が異なった。飽和水蒸気圧は気温が高いほど高くなるため、飽和水蒸気量も同じく気温が高いほど大きくなる。今回の測定では、気温も相対湿度も高い(27°C, 59%)での測定は、(15°C, 49%)での測定よりも、空気中の水

蒸気量が多いことは明らかである。このためにガラス表面の電気伝導度が高まり、従来からいわれている加湿効果による摩擦帯電の緩和と解釈することができる⁶⁾。しかし、1気圧から減圧したときは、内部の空気の気温や相対湿度の変化などは不明であるので、両者の差異については、現在のところ理由は考察できていない。この実験からは、試料がガラス管とステンレスの場合には、封入した空気を減圧することでステンレスの帯電は低減し、湿度が低い方がその効果は大きい可能性があるということが予想されたにすぎない。

図5にアルミナ粒体の帯電量の圧力依存性を示す。本実験では、比較のため、乾燥空気を封入した実験も行った。図4で示したステンレス粒体の場合と同様に、全体的には気体圧力が低くなるほど、アルミナ粒体の帯電量は低減した。その原因はステンレス粒体の場合と同じく、マイクロギャップ放電などによる緩和ではないかと考えられる。

1気圧 (= 1×10^5 Pa) での測定値では、乾燥空気の場合がアルミナの帯電量が最も高く、減圧による帯電の低減効果も相対的に大きいように思われる。低い気圧ほどアルミナ粒体の電荷量は減少し、約0.02気圧では大気圧下に比べて25%程度まで低減した。湿気のある空気の場合、気圧が下がっても帯電量が変わらない範囲が見られたが、さらに低い気圧では、やはり帯電量の低減傾向が観測された。

本研究では圧力の制御範囲がここまでであったため、これより低い圧力でもさらに減少するかは確かめられなかった。しかし、これまでの基礎的な研究からは、気圧が 10^2 Pa 以下になると、マイクロギャップ放電の発生頻度が下がり、帯電緩和が不十分となって正味の帯電量が増加するようになる³⁾。高真空の場合は放電緩和がなくなるため、減圧による帯電緩和効果は期待できなくなると考えられる⁴⁾。

一方で、減圧による帯電緩和効果が見られなかった例もある。図6にソーダライムガラス粒体の帯電量の圧力依存性を示す。まず全体的には、図4と図5で示したステンレスやアルミナとは異なり、減圧すると、帯電量が増える場合が見られ、この傾向も一樣ではなく、気体の湿度に依存しているようにも見られる。

乾燥空気の場合には、容器内の気体圧力を減少しても帯電量が変わらず、0.2気圧程度までは一定値であった。0.2気圧以下ではわずかに帯電量は減少したが、その効果はアルミナやステンレスで見られたものよりも小さかった。

室内空気 (17°C, 62%) の実験では、1気圧から0.7気圧まで減圧する間は、帯電量が増えた。本研究を開始して以来、減圧して帯電量が増えた例としては、このソーダライムガラスが初めてであった。さらに減圧した場合、0.3気圧までは一定値をとり、さらに減圧することで、帯電量は減少に転じ、測定できた最小の0.02気圧で、乾燥空気と同じ値に収束した。また、室内空気 (27°C, 59%) の条件では、大気圧から減圧するにつれて、帯電量が単

調に増加する結果となった。0.02 気圧まで減圧した結果、乾燥空気と同程度の値となった。

アルミナやステンレスでは減圧によって摩擦帯電が低減する結果が得られた。その一方で、ソーダライムガラスでは減圧することで帯電量が増える場合も確認された。低減する原因としては、マイクロギャップ放電による帯電緩和が考えられるが、帯電が増加する原因については現在は不明である。このメカニズムの解明には、更なる実験を行い、慎重に検討すべきである。

今回の実験からは、減圧することで帯電が低減する場合だけではなく、低減しない場合やむしろ増える場合があることも明らかになった。実用にあたっては、試料ごとに減圧による帯電低減効果の有無を確認する必要がある。

4. まとめと今後の課題

真空引き可能なガラス管とステンレス配管を使用して、真空ポンプで減圧した状態での粒体の摩擦帯電量を測定する装置を製作した。

金属試料としてステンレスを用いた実験では、ガラス管との摩擦帯電は減圧するほど低減することが確認された。帯電しやすいアルミナ粒体を用いた実験でも、やはり減圧するほど、帯電量が低減する傾向が見られた。

ステンレスやアルミナで観測された、減圧によって帯電が低減する現象は、帯電した表面間のマイクロギャップや表面上で気体放電が活発に起こり、帯電が緩和（中和）したためと推測される。

一方で、ソーダライムガラスを用いた実験では、減圧すると帯電が低減する場合と、増加する場合が観測されたことに注意する必要がある。したがって、実際に帯電が低減するか否かを試料や材料ごとに確認する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 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*. 2014; 57: 167-170.
- 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, 細瀬絵里, 上野聖子, 荒川一郎. 真空中と気体中でのダイヤモンドとサファイヤの摩擦帯電. *静電気学会誌*. 2015; 39: 88-93.
- 4) 三浦崇. 高真空下での静電気現象. *静電気学会誌*. 2019; 43: 56-58.
- 5) Lowell J and Rose-Innes AC. Contact Electrification. *Adv. Phys.* 1980; 29: 947-1023.
- 6) 労働安全衛生総合研究所. 静電気安全指針 2007. JNIOOSH-TR-No.42. 2007.