

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

三浦 崇^{*,1}

(2018年9月13日受付; 2018年11月5日受理)

Efficiency of Triboelectrification Reduction due to Micro-gap Discharge in an Argon Gas

Takashi MIURA^{*,1}

(Received September 13, 2018; Accepted November 5, 2018)

Triboelectrification by sliding friction between a stainless steel pin and a fused quartz disk was measured in a vacuum, argon-nitrogen mixtures, and neon. The initial charge separation by friction was determined by the measurement in a vacuum. In ambient gases, the charge separation process and intermittent micro-gap gas discharge were repeated during friction. The rates of residual charge was calculated as the net value of electrification in the ambient gas divided by amount of the initial charge. The rate in pure argon at 1 atm was about 1% which was much smaller than the rate of about 25% in pure nitrogen and the rate decreased with increase of partial pressure of argon in the mixture. The neon gas indicated highly reduction effect that is similar with argon.

1. 研究背景と目的

固体間のすべり摩擦では接触界面で電荷分離が発生し、剥離後の表面は帯電するが、分離した電荷の一部は固体間のマイクロギャップで直後に起こる気体放電によって一部が中和するため、摩擦後の表面帯電量は接触による電荷分離量よりも小さくなる¹⁾。すなわち、摩擦帯電は発生した静電気自体が引き起こす気体放電によって緩和する。

この帯電の緩和については、金属と絶縁体の摩擦では、金属に発生する電荷量を直接測定することで明らかになっている²⁾。

放電による緩和効果の気体種依存性について、ステンレスと石英の摩擦において、乾燥空気、窒素、アルゴンの中で摩擦帯電量を測定し、真空中での真の摩擦帯電量を100%として、気体中での摩擦帯電量、つまり、放電緩和しなかった電荷量の割合（これを残留率とする）を報告した³⁾。0.4気圧では、3つの気体種とも残留率が5%以下となり、摩擦帯電を緩和する効果があった。1気圧下では、乾燥空気と窒素の緩和効果が小さく、それぞれの残留率は30~40%であった。しかし、アルゴンで

は残留率は1%以下となり、その緩和効果は1気圧下でも比較的高いことが明らかになった。

このことから、従来にはない静電気防止を目的としたアルゴンの工業的な応用が考えられる。比較的安価なアルゴンと着火防止用パージガスとして広く使用されている窒素を利用したときの帯電緩和効果の大きさを調べることに意義があると考えた。期待する緩和効果の大きさからアルゴンの純度の許容範囲を知ることができれば、アルゴン雰囲気による摩擦帯電抑制手法の利用可能性を広げることができる。

本研究では、アルゴン1気圧下でのステンレス球面と石英平面とのすべり摩擦で、ステンレスの電荷量を測定することで、電荷分離とマイクロギャップ放電による帯電緩和を観測した。これと同時に、放電発光を光学顕微鏡とCCDカメラで撮影し、放電の空間分布を測定した。また、様々な混合比率のアルゴン-窒素混合ガスにて残留率を測定した。ネオン1気圧下でも測定し、アルゴンと比較した。

2. 実験方法

実験装置を図1に示す。回転するディスクにピンを押しつける方法で、連続的にすべり摩擦を行う。真空槽に導入する気体の圧力の絶対値はダイヤフラムゲージで測定した。

ディスクは融解石英 (SiO_2 , ガラス, 厚さ1 mm), ピンはステンレス球面 (曲率半径0.5 mm) を使用した。接触荷重は130 mNとした。ディスクの回転数は200 s

キーワード: 真空, 金属, 絶縁体, 除電, ネオン

* 労働安全衛生総合研究所

(〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6)

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

¹ miurat@s.jniiosh.johas.go.jp

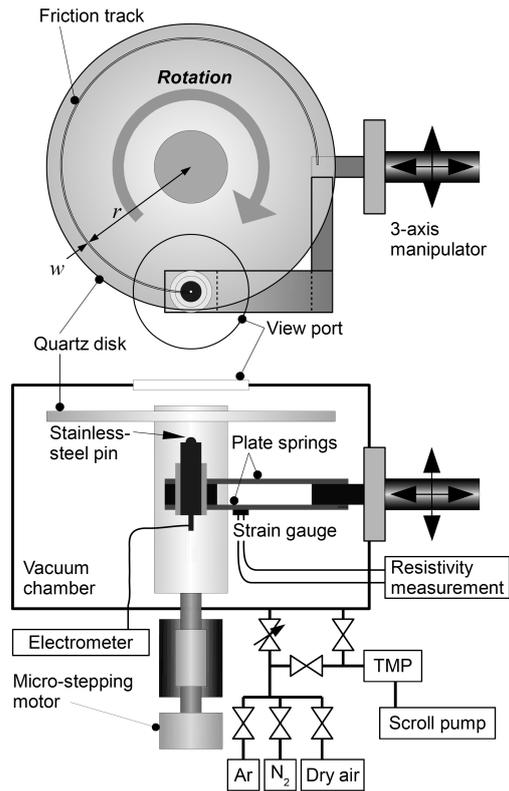


図1 実験装置
Fig.1 Experimental setup.

で1回転とし、速度は一定にした。1回の測定は1回転として、摩擦を始める位置と止める位置はすべて同じとした。ピンはディスクの中心から24.0 mmに設置した。

アルゴンと窒素の混合気体は真空槽内で生成した。ターボ分子ポンプによって到達圧力(約 10^3 Pa)まで排気し、バルブを閉めた真空槽内にアルゴンを特定の圧力まで導入し、これに窒素を追加で導入して全圧を1気圧にした。混合気体のアルゴン分圧比(%)は最初に導入したアルゴンの圧力で調整した。混合気体は以下、Ar(%) + N₂と表記する。また、窒素とアルゴンは、それぞれN₂(1 atm), Ar(1 atm)と表記する。ネオンについても同様である。

摩擦中にステンレスの電荷量をピンに接続したエレクトロメータ(エーディーシー社製8252, 測定レンジ100 nC, 内部静電容量10 nF)で測定し、0.2 sごとにその値を記録した。

真空中での200 sで到達した電荷量を100%とし、同じく気体中での200 sで到達した正味の電荷量(マイクロギャップ放電による緩和後の帯電量)を百分率で表した値を残留率と定義した。

接点の画像や発光画像は、透明な石英ディスクを透して光学顕微鏡で観測し、CCDカメラで撮影した。接点はこれまでの摩擦実験によって先端が摩耗しており、平

坦な円形の接触面が観測された。接触面の直径が摩擦トラックの幅に相当し、その値は87 μ mであった。

Ar(1 atm)でのすべり摩擦中に発生したマイクロギャップ放電の発光画像を撮影した。カメラの露光時間は10 s間とした。10 sの間には数回のマイクロギャップ放電が起きたため、1枚の発光画像には数回の放電発光の像が記録された。

3. 結果

真空, N₂(1 atm), Ar(1 atm), およびAr(50%) + N₂での、摩擦中のステンレスピンの電荷量の時間変化を図2に示す。ディスクが1回転した200 sで回転だけを止めた。摩擦によってステンレスが正に帯電し、石英表面が負に帯電した。回転を止めた後に一定の値を示しているのは、帯電した石英表面からの電荷の逆流が起きていないことを示している。

真空中のすべり摩擦では、1回転したときの電荷量は+9.5 nCに達した。これは帯電速度にすると、平均で48 pC/sである。

N₂(1 atm)では、摩擦により電荷量が増加する中で断続的に放電が起こり、最終的には1回転で2.8 nCに達した。この値と真空中での到達値から電荷の残留率を計算すると、29%となった。

Ar(1 atm)では、放電緩和が窒素よりも著しく起こり、1回転で達した帯電量は40 pCであった。したがって残留率は0.42%となった。

同様に、Ar(50%) + N₂による実験結果も図2に示す。混合気体では、1回転で達した帯電量はN₂(1 atm)とAr(1 atm)の到達値の間になった。図に示したAr(50%)

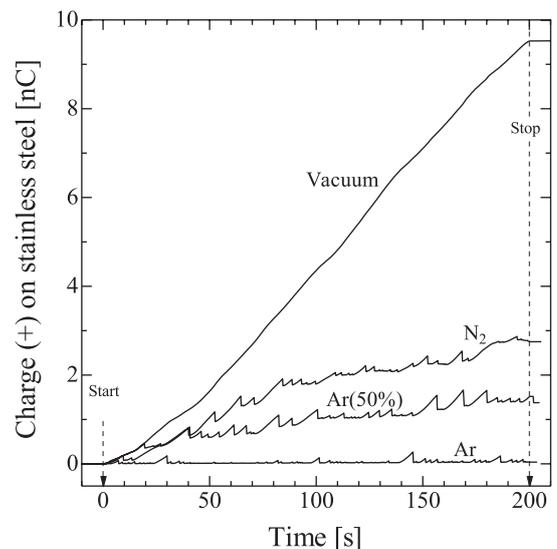


図2 ステンレスピンに発生した電荷量
Fig.2 Generated positive charge on a stainless-steel pin.

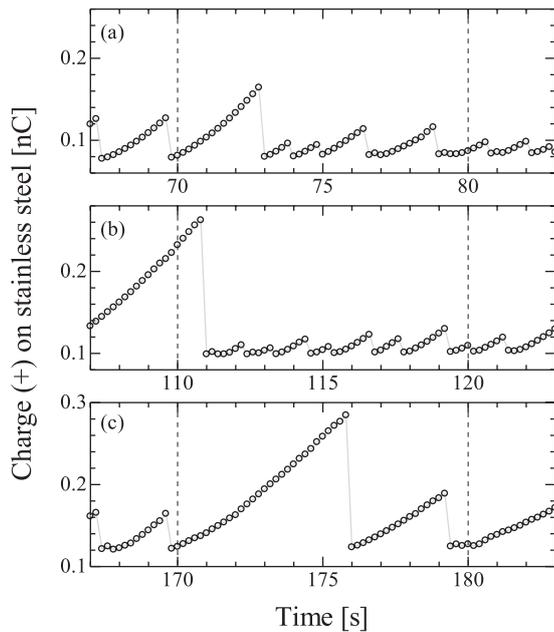


図3 Arでの摩擦帯電の発生と緩和の素過程
Fig.3 Elemental process of charge and discharge in Ar.

+N₂では、1回転で達した電荷量は1.5 nCであり、残留率は16%となった。

Ar (1 atm)において、電荷量の測定と摩擦接点周辺で起こるマイクロギャップ放電による発光画像を同時に測定した。画像を測定した時間に対応した電荷量の時間変化のグラフを図3に示す。グラフの縦軸の幅は全て0.2 nCとした。帯電量の時間変化(傾き)は約30 pC/sとほとんど同じである。よって、放電から放電までの時間が長いほど、放電した電荷量は大きくなる。

しかし、この傾きは長期的には測定ごとに変動がみられ、およそ40 ± 10 pC/sの範囲で変化していた。これは、その測定時の摩擦による電荷分離の大きさが変動している可能性があり、残留率の算出の際に誤差として考慮する必要がある。

発光画像は70から80 s、110から120 s、170から180 sの3つの区間に分けて測定し、その画像を図4a-1、4b-1、4c-1にそれぞれ示す。画像の中に示した白い円はステンレスピン先端の接触面を示している。

図3aから、70から80 sでは放電は5回発生したことが分かる。1回の放電では、0.1 nC以下の電荷量が放電したものであった。これに対応する発光画像は図4a-1である。接点の中心を通り、摩擦トラックの方向の発光強度分布(断面図)を図4a-2に示す。横軸は接点中心からの距離(L)である。これによると、L > 100 μmで発光があり、L = 200 から 300 μmで発光が最大となり、L > 300 μmでは距離に応じて緩やかに減少していった。L = 1000 μmでも微弱ではあるが発光が認められる。

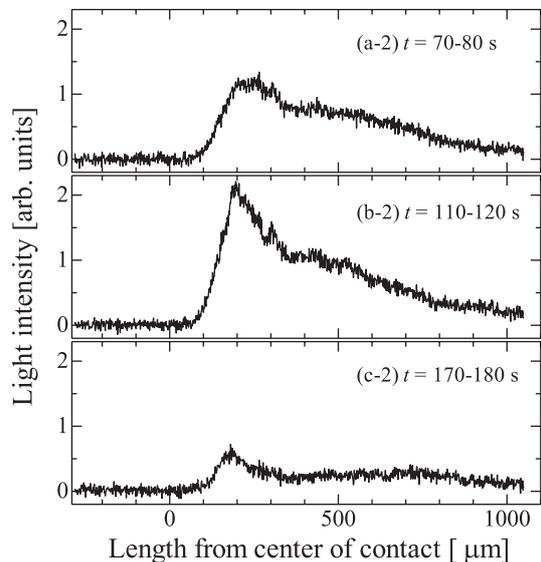
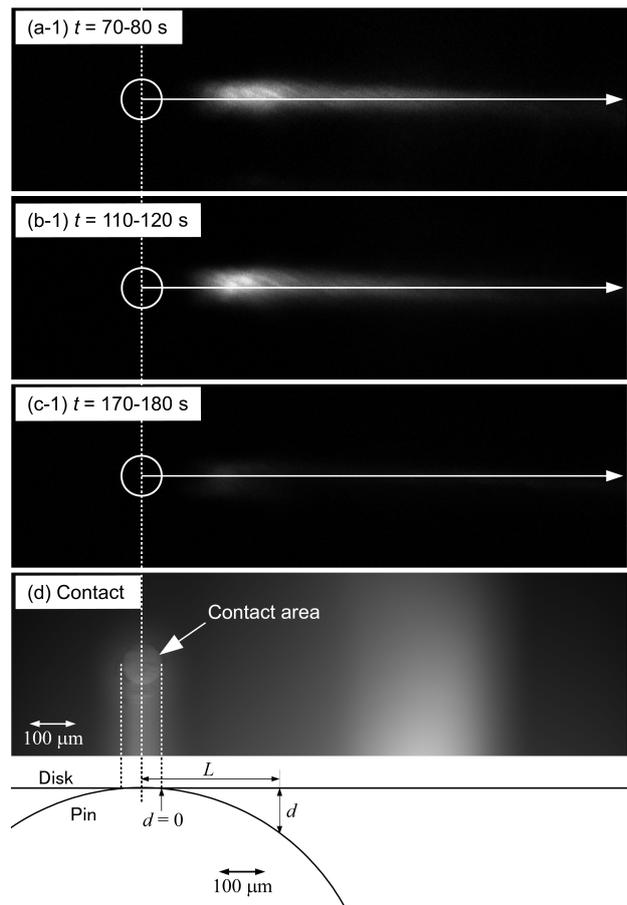


図4 Ar (1 atm)での電荷分離と放電の素過程に対するマイクロギャップ放電の発光画像と発光強度分布
Fig.4 Image measurements of spatial distribution of microgap discharge during friction in Ar and light intensity as a function of length from center of the contact along by the friction track.

同様に、図3bから、110から120 sでは8回起り、最初の放電では0.17 nCの電荷量が緩和した比較的大きな放電であった。ただしこの放電には110 sより以前に

蓄積していた電荷も寄与している。その後の7回は0.03 nC以下の小さな放電であった。図4b-1に示した放電発光画像からは、同じく強い発光は $L = 200 \mu\text{m}$ の位置で観測されている。これは図4b-2の強度分布が明確に示しているが、これも同様に $L = 1000 \mu\text{m}$ 付近まで長く発光が続いていることを示している。

図3cと図4c-1および図4c-2も同様である。170から180 sの間では、放電は2回だけ観測され、最初の放電は0.17 nCの大きさで、2回目は0.07 nCの大きさであった。図4c-2が示すように、 $L = 200 \mu\text{m}$ 付近で発光は最大となった。

図4a-1, 4b-1, 4c-1に示した発光の画像から、接点より右に長く伸びた発光領域は、図に示した白線よりもやや下に曲がっている。画像の接点から右端までの距離は約1 mmであるので、画像では摩擦トラックは約 $40 \mu\text{m}$ 下方にずれる。発光領域の曲がりはこちらとおよそ一致し、すなわち長さ $1000 \mu\text{m}$ にもなった放電発光はカーブを描く摩擦トラックに沿っていることが分かった。

図5に、残留率のアルゴン分圧比依存性の結果を示す。全体的にはアルゴンの分圧比が高いほど、残留率は低下する傾向を示している。直線は、Ar (1 atm)での測定を通る直線で最小二乗フィッティングした結果であり、全体の傾向を示す目安として示した。

プロットごとに示した残留率の誤差の範囲は、放電と放電の間の電荷分離過程での傾きが $\pm 25\%$ 変動したので、これが真空中の電荷分離量の誤差の大きさになりうると考えて算出したものである。

図6に、ネオン1気圧下での実験結果を示す。残留率は1.8%となった。3回の測定の平均でも2.5%であった。ネオンでもアルゴンと同様の帯電緩和効果があることが確認された。両者を比較した場合、3回交互に実験した

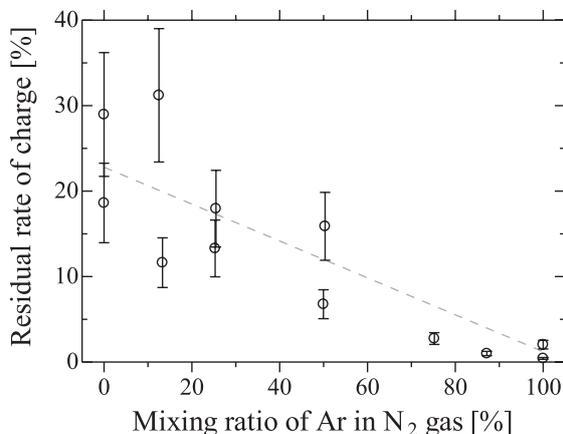


図5 残留率のアルゴン分圧比依存性
Fig.5 Rate of residual charge as a function of partial pressure ratio of argon.

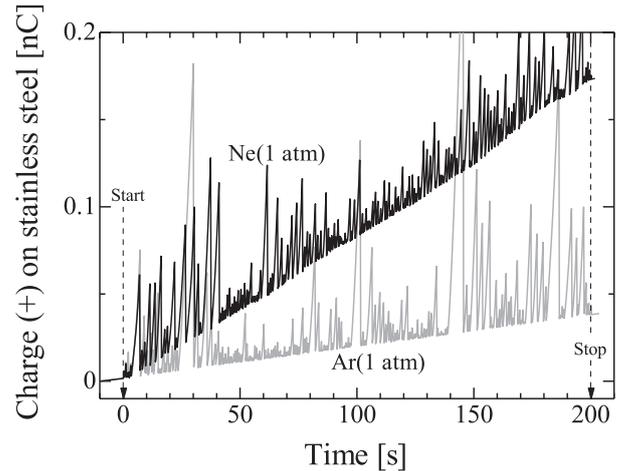


図6 Ne (1 atm)での摩擦帯電と放電
Fig.6 Process of charge generation and discharge during friction in neon gas at 1 atm.

が、全てネオンよりもアルゴンの方が緩和効果は高い結果となった。

4. 考察

真空中ではディスクが1周して到達した電荷量9.5 nC、摩擦トラックの幅 $87 \mu\text{m}$ と1周の長さ $2\pi \times 24 \text{ mm}$ から、石英表面での平均の電荷密度は、 $7.3 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$ となる。この値は、これまで調べられている摩擦帯電の電荷密度⁴⁾と同等である。

図4a-1, 4b-1, 4c-1に示した放電発光の強度分布から、 $L = 200 \mu\text{m}$ でそれぞれ発光強度が最も高い。ここでの石英表面に垂直でステンレス球面までの距離(d)は $40 \mu\text{m}$ である。 $L = 300 \mu\text{m}$ では、 $d = 100 \mu\text{m}$ となる。また、 $L < 200 \mu\text{m}$ の範囲では発光は急激に弱くなり、 $L < 100 \mu\text{m}$ では発光はほとんど無い。これらのことから、 $L < 300 \mu\text{m}$ で $L = 200 \mu\text{m}$ 付近にピークを持つ放電は、石英表面とステンレス表面との $40 \sim 100 \mu\text{m}$ 程度のマイクロギャップでの放電と推測される。

一方、 $L > 300 \mu\text{m}$ で細長い分布を持つ放電発光は、摩擦トラックに沿った曲線を描いているため、帯電した石英表面を伝わって起きた放電ではないかと推測される。この領域では、曲率半径 0.5 mm のステンレス球面やその支持円柱の表面は $500 \mu\text{m}$ 以上離れており、もしも垂直に放電したとしたら、発光分布はもっと広がって観測されるはずである。また、放電は1から6秒ごとに起き、つまり、1度の放電で電荷が消失する帯電領域の長さは 0.75 から 4.5 mm にも及んでいる。マイクロギャップで起こる放電に伴い、石英表面の電荷は摩擦トラックに沿った方向へ放電しながら移動したと考えられ、この種の放電の起きやすさが緩和効果に影響している可能性も考えられる。

アルゴンが窒素よりも放電緩和効果が高いのは、定性的には、コロナ放電開始電場⁵⁾は窒素 (38.0 kV/cm) よりもアルゴン (7.2 kV/cm) の方が低いことや、パッシェン曲線の最小火花電圧が低いこと⁵⁾などが関係していると思われる。また、相対衝突電離係数 (α/p) は、少なくとも相対電界強度 (E/p) 20 から 1000 V/(cm・mmHg) の範囲では、アルゴンの方が窒素よりも大きく⁶⁾、つまり、初期放電はアルゴンの方が起きやすいと考えられることなども、残留率が低くなる原因として解釈することができる。

しかし、コロナ放電開始電場⁵⁾がアルゴンよりも低いネオン (4.5 kV/cm) において、図6に示したように、残留率はアルゴンよりも高かった。放電によって帯電が緩和していることは確かであるが、そのメカニズムの詳細についてはさらなる研究が必要である。

図5に示したアルゴンと窒素の混合気体における残留率の実験結果について、混合気体では、N₂ (1 atm) と Ar (1 atm) の中間の値となった。全体的には、アルゴンの分圧比が高いほど、残留率は低くなった。混合気体の放電特性の文献値が得られていないが、アルゴンと窒素の間に電離などの相互作用がなく、電子衝突電離過程が主であれば、衝突電離係数は平均になると考えられるので、アルゴン分圧の増加にしたがって、残留率は単調に減少したものと理解できる。

過去の研究³⁾では、ステンレスピンと石英ディスクの摩擦実験で、乾燥空気と室内空気 (27度, 相対湿度 66%) での1回転での残留率は、それぞれ約 56%と約 23%であり、乾燥空気の方が残留率は高かった。また、ステンレスピンとPETディスクの実験では、湿度が低い方が残留率は高かった⁷⁾。

一般に静電気が問題となるのは真空中ではなく、乾燥した空気中である。乾燥空気の場合 (残留率 56%) を通常発生する静電気の上限とすれば、図5が示すように、残留率が約 1%となった高純度アルゴン雰囲気であれば、静電気を最大で 1/50程度に減少させることができると言える。

帯電緩和効果の実証の一例として、内部をよく乾燥したペットボトルにアルミナ球 (直径 0.5 mm) と気体試料を封入し、激しく振った後の写真を図7に示す。乾燥空気を封入したボトル (右) では球体がペットボトルの内壁に付着しており、叩いても落ちにくい程であったが、アルゴンで満たしたボトル (左) では付着せず、なめらかに下部に落ちた。絶縁体間の摩擦でもスペクトルや画像の測定からマイクロギャップ放電が観測されており⁸⁾、アルゴンは絶縁体間摩擦帯電の緩和にも効果があると考えられる。



図7 アルゴンと乾燥空気の帯電緩和の違い
Fig.7 Results after shaking the PET bottles; they contained alumina balls (diameter = 0.5 mm) and were filled with argon gas (left) and dry air (right).

5. まとめ

アルゴン - 窒素混合気体の中でのステンレスと石英のすべり摩擦による帯電量の測定から、電荷分離過程と気体放電による帯電緩和過程と放電発光の空間分布を測定した。放電による緩和がない真空中での帯電量を 100% として、アルゴン中では放電による緩和後の帯電量、すなわち分離電荷の残留率は約 1%、窒素中では約 25%であった。混合気体では、アルゴンの分圧比が高いほど残留率は下がった。ネオンでもアルゴンと同様の大きな帯電緩和効果があった。残留率はネオンよりもアルゴンの方が低い結果となった。

参考文献

- 1) 三浦 崇, 細測絵理, 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, **39** (2015) 88
- 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
- 3) T. Miura, Observation of charge separation and gas discharge during sliding friction between metals and insulators. Journal of Physics: Conference Series, **646** (2015) 012057
- 4) J. Lowell, and A. C. Rose-Innes, Contact electrification. Adv. Phys. **29** (1980) 947
- 5) 電離気体論, 電気学会, 第27版 (1997)
- 6) J. M. Meek and J. D. Craggs, Electrical Breakdown of Gases, Clarendon Press, Oxford (1953)
- 7) 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
- 8) T. Miura and I. Arakawa, Gas discharge caused by triboelectricity around a contact during friction between insulators. IEEE Trans. Diel. Electr. Insul., **14** (2007) 560