

真空中と気体中でのダイヤモンドとサファイアの摩擦帯電

三浦 崇^{*, **, 1}, 細渕 絵理^{**}, 上野 聖子^{**}, 荒川 一郎^{**}

(2014年5月26日受付; 2014年12月18日受理)

Static-electricity Due to Friction between Diamond and Sapphire in a Gas and Vacuum

Takashi MIURA^{*, **, 1}, Eri HOSOBUCHI^{**}, Seiko UENO^{**} and Ichiro ARAKAWA^{**}

(Received May 26, 2014; Accepted December 18, 2014)

Experiments of sliding friction between diamond and sapphire in a vacuum and a pressure-controlled gas ambience were performed in order to study initial charge separation and relaxation process in detail. The initial charge as a function of velocity of the sliding friction was investigated from 10 $\mu\text{m/s}$ to 0.1 m/s and the result suggests that relaxation of a part of the initial charge should occur at the interface in the duration of the contact time about 10 ms. In the experiments at a relatively slow sliding speed, charge generation process and relaxation event due to an intermittent gas discharge were completely resolved. The amount of charge generation depended on the gas pressure and this implies a continuous charge recombination due to dark current between highly electrified diamond and sapphire surfaces.

1. はじめに

2つの固体表面を摩擦して起こる帯電（摩擦帯電）と単に接触させるだけで起こる帯電（接触帯電¹⁾）は本質的に同じか異なるかという問題は、静電気の発生機構を研究する上で興味深い。もし同じであれば、摩擦による帯電の電荷密度は速度に依らない。いくつかの研究では、電荷密度は速度に依存しないという結論に至っている^{2,4)}。しかし、その測定した速度範囲は2桁ほどである。

その一方で、固体の種類や雰囲気によって、摩擦帯電量は速度に依存するという実験結果⁵⁾も示されており、その機構が議論されている。摩擦帯電の実験から、放電による帯電の緩和¹⁾、固体に起因する塑性変形¹⁾、摩擦熱によるゼーベック効果⁶⁾、電荷分離にかかる時間⁷⁾、分子運動⁸⁾など様々なメカニズムが推測されている。また、それらは複合的に起こると考えられるので、摩擦における界面での電荷分離の原因を明らかにすることは難しい。

摩擦による電荷分離を可能な限り単純にして詳しく研究するために、我々は次のような点に着目し、実験方法

を考案してきた。

- ・ 雰囲気の種類・圧力を制御すること⁹⁾,
- ・ 接触面積を測定すること,
- ・ 摩擦直後に電荷量を測定すること¹⁰⁻¹²⁾,
- ・ 可能な限り低速で実験すること。

摩擦による電荷分離を測定するためには、気体放電による帯電の緩和を防止しなくてはならない。そのための一つの方法は、実験を真空中で行うことである¹²⁾。加えて、気体放電による緩和効果を詳しく調べるために、圧力を制御した気体中での測定も必要である。気体放電は断続的に起こるため、放電前の電荷分離過程を観測するには低速での実験が有利である。摩擦電気を研究する上で重要な電荷密度を実験から求めるには、接触面積を測定する必要がある。このため、一方の試料を透明なものにして、接触面を顕微鏡で観測する方法をとった。摩擦部分の温度上昇や表面変化を最小限に留め、再現性の高い実験結果を得るためにも低速での実験が必要であると考えた。

静電気による災害を防止するためには、静電気の発生を抑えるメカニズムの解明が重要である¹¹⁾。また、摩擦による電荷分離現象から静電スパークまでの過程が詳細に解明できれば、二重三重の静電気災害対策が実現可能となる。摩擦材料の一方が金属である場合には、金属とエレクトロメータの入力端子を電氣的に接続して発生した電荷量を測定できるが、ガラスライニング表面やテフロン加工表面のように、摩擦材料の両方が絶縁体である場合でも帯電量の測定を可能にしなくてはならない。

絶縁体で発生した電荷量を摩擦の直後に計測するため、ピンオンディスク摩擦試験法を応用し、絶縁体ピン

キーワード：摩擦電気、絶縁体、気体放電、帯電緩和

* 独立行政法人 労働安全衛生総合研究所
(〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6)

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

** 学習院大学理学部物理学科

(〒171-8588 東京都豊島区目白 1-5-1)

Department of Physics / Gakushuin University, 1-5-1, Mejiro, Toshima-ku, Tokyo 171-8588, Japan

¹ miurat@s.jniosh.go.jp

試料の表面全体を金で蒸着し、摩擦で金が剥離した絶縁体界面で摩擦中に次々と発生する電荷をエレクトロメータで捕集する方法を開発した¹⁰⁾。これにより、ダイヤモンドとサファイヤの摩擦における電荷分離の摩擦速度依存性と気体圧力依存性を詳しく調べた。摩擦帯電の出発点である電荷分離からマイクロギャップ放電¹²⁾による帯電緩和に至るまでのメカニズムを明らかにすることが本研究の目的である。

2. 実験装置

実験装置の概略図を図1(a)に示す。回転するディスク形状の試料に、ディスク面に垂直に下側からピン形状の試料を押し付ける方法(ピン-オン-ディスク法)で摩擦実験を行った。

真空中や気体圧力を制御した中で実験するために、真空槽内で摩擦ができるように装置を設計した。ターボ分子ポンプとダイヤモンドポンプの組み合わせで排気し、到達圧力(真空度)は約 10^{-4} Paであった。摩擦部分の接触面積や摩擦中に起こる放電の発光強度と分布は顕微鏡を通じて CCD カメラで記録した。

ディスク試料にはサファイヤ(Al_2O_3 単結晶)を用いた。ディスクの大きさは直径 50 mm、厚さ 1 mm で、両面は平坦に研磨され、透明である。摩擦面はサファイヤ結晶の(0001)面とした。サファイヤは波長 300~4000 nm の範囲で光吸収はなく、使用したディスクで透過率を実測したところ、400~900 nm の範囲で 0.99 以上であった。

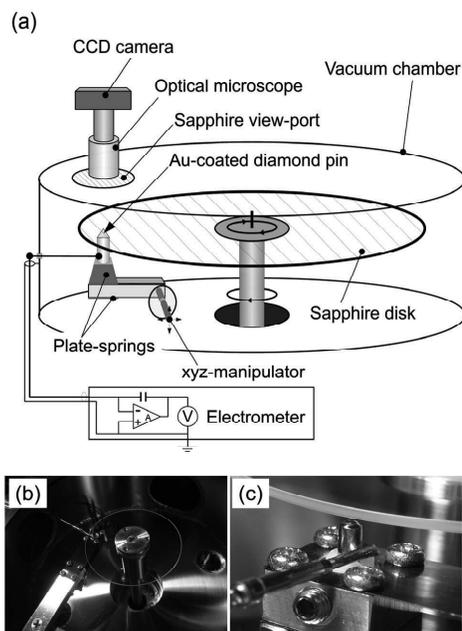


図1 実験装置の (a) 全体の概略図と (b) 摩擦機構、及び (c) ピン試料。

Fig. 1 (a) Illustration of experimental setup, and (b) an equipment of pin-on-disk friction, and (c) pin specimen.

ディスクの回転はステップモーターによって制御し、ステップ角 (0.072° から 0.000288° まで選択) と駆動周波数 (100 または 5,000 Hz) の組み合わせ、及び摩擦する位置のディスク中心からの距離 (約 23 mm) に基づいて摩擦速度が設定でき、本研究では、 $11 \mu\text{m/s}$ から 140 mm/s (1 秒間の回転数 (rps) が 8×10^{-5} から 1 に相当) の摩擦速度範囲で実験した。真空中への回転動力伝達には磁気結合型の回転導入機を用いた。

ピン試料として、先端が曲率半径 0.3 mm の球面に加工されているダイヤモンド (工業用天然ダイヤモンド) を用いた。ピンを支持する板バネの歪の大きさを摩擦の接触荷重を調節し、バネに貼り付けた歪みゲージでその値を読み取った。

ダイヤモンドとサファイヤの摩擦中に発生した電荷量をエレクトロメータに導いて測定するため、ダイヤモンドピンの表面全体に真空蒸着法で金の薄膜をコーティングした。接触界面の金薄膜は摩擦で簡単に剥離するため、接触面は絶縁性のダイヤモンド表面となるが、界面で発生した電荷は金薄膜を通じてエレクトロメータ (アドバンテック社製 TR8652) に取り込むことで、摩擦で発生した電荷を検出した。先端の金が剥離したことは、顕微鏡観測に加え、摩擦帯電の符号が負から正に転じたことでも確認できた。

エレクトロメータは帰還増幅タイプであるので、ピンと接地との間の静電容量で電荷は保持されず、摩擦でピンに発生した電荷のうち、ディスクの帯電による静電誘導で界面とピン先端付近に保持される電荷を除くほとんど全てはエレクトロメータの入力容量に移して測定できる。

ディスク面の帯電がピン (金の薄膜) に電荷を誘導することによって測定値は真の電荷発生量より少なく測定される可能性がある。ディスクは接地されたステンレス製の真空槽に囲まれているので、直径 2 mm のピンに誘導を引き起こすディスク上の電荷は接触点近傍の一部である。ピンの大きさと摩擦トラックの円周の長さから、ディスクを 1 周させたときの電荷量の測定値に対する静電誘導の影響は単純な計算から 1.4% と推測できる。実際に摩擦開始直後では、エレクトロメータの指示値の上がり方が緩やかであり、発生した電荷の一部がピン先端に引き留められ、測定器に入力されていない可能性がある。

静電誘導の影響についての追加的な実験として、真空中で円弧の長さ 1 mm だけ摩擦してトラック上に微小帯電領域を作り、電荷の位置 (円周上の座標) と誘導電荷量の関係を調べた。連続的な摩擦に対応するために誘導電荷量を積分して計算した結果、ディスクを 1 周させたときの測定器の指示値は、ディスクの帯電量 (真の値)

より4.8%低くなると見積もられた。また、摩擦開始時に指示値が緩やかに増加することも確認された。ただし、本論文で示す測定結果は静電誘導の影響を含み、これを除去する補正等を行っていない。

接触面は円形で、顕微鏡観測から直径は $10 \pm 5 \mu\text{m}$ と推定できた。電荷密度や接触時間を計算する際に直径を $10 \mu\text{m}$ としたが、計算結果には数分の一から数倍の誤差を考慮する必要がある。荷重20から300 mNの範囲で実験した結果、接点の大きさは荷重に依存する様子は見られず、摩擦で発生した帯電量も荷重にほとんど依存しなかった。これは、ダイヤモンドの球面が弾性変形して接触面積を決めているのではなく、摩耗によって先端が平坦化しているためと考えられる。測定では、摩擦実験の前後で接触面をCCDカメラで撮影し、大きさに変化がないことを確認した。また一連の測定の前後でも、接触面積に変化がないことを確認した。

3. 結果と考察

3.1 真空中と気体中の摩擦電気の測定

ダイヤモンドに接続したエレクトロメータで測定したネオンガス（純度99.999%）中の摩擦での帯電量の時間変化を図2に示す。横軸は摩擦の開始を0 sとして摩擦の経過時間を示す。ディスクの回転数は1秒間に0.02回転とし（摩擦速度は2.71 mm/sに相当）、ちょうど4周回転した200 sの時点で回転を停止し、電荷量測定をしばらく続けた。

真空中の実験結果（グラフ-i）によると、摩擦の開始（時間0 s）直後からディスクがちょうど1回転するまでの間、正の電荷量は時間に比例して増加した。これは、摩擦によってダイヤモンドが正に、サファイヤが負に帯電したことを示している。2周目以降では電荷量は一定となり、摩擦によって新たに電荷は発生しなかった。これ

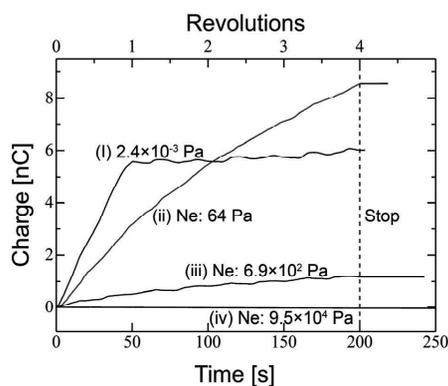


図2 様々な気体圧力下での摩擦でダイヤモンドに生じた電荷量の実時間測定

Fig. 2 Real-time measurement of charge on diamond during sliding friction in a various gas pressure.

は、ダイヤモンドと接触したサファイヤの摩擦面（摩擦トラック）の帯電量が飽和に達し、加えて負の電荷が摩擦トラックで保持されていることを示している。

図2のグラフ-ii, -iii, -ivより、圧力が高いほど最初の1周で到達する電荷量の大きさが低下していることが分かる。これは、摩擦中に接触点付近のダイヤモンドの金薄膜面とサファイヤ面とのマイクロギャップで起きる気体放電により電荷の再結合が起きて、帯電が緩和したためである。放電が起きていることは発光測定からも明らかになっている¹¹⁾。図2のグラフ-ivが示すように、約 10^5 Pa 中での放電による緩和を含めた正味の帯電量は、真空中での測定と比べて1%以下となった。

圧力64 Paでの測定結果（図2のグラフ-ii）を見ると、1周目では放電による緩和のために帯電量は真空中の値（グラフ-i）よりも低いが、2周目以降も電荷量が増え続け、3周目からは真空中での飽和した帯電量を超えてダイヤモンドに流入する正の電荷量は増加し続けている。これは、気体が影響してサファイヤ帯電面の負電荷が摩擦トラックの領域から流出し、常に電荷密度が飽和量を下回るために、ダイヤモンドとの再接触時でも電荷移動が続くことを示唆している。サファイヤの摩擦面の負の電荷は気体が直接持ち去ったか、もしくはサファイヤ表面を伝わって広がったかが考えられるが、負電荷の正確な行先やその原因は明らかではない。しかし、帯電した表面を気体にさらすと帯電面の電荷が除電される可能性がある。そこで、摩擦の実験後に真空槽内に200 Pa程度の窒素やネオンを導入し、再び真空引きしてから、次の真空中での帯電量測定を行うことで、高い実験再現性が得られるようになった。

3.2 電荷分離とマイクロギャップ放電の観測

図2のグラフ-ivのように、気体圧力が 10^4 - 10^5 Pa の範囲では、測定された電荷量は真空中摩擦での飽和帯電量の1/100以下であった。放電が断続的に起こることは光電子増倍管による観測からも明らかになっている¹³⁾。気体中の摩擦における電荷分離と放電の素過程を詳しく調べるため、速度を可能な限り下げた摩擦実験を行った。摩擦の速度を $50 \mu\text{m/s}$ 以下にしたところ、電荷の蓄積過程と放電過程を分離して測定することができた。ネオンガス $1.3 \times 10^4 \text{ Pa}$ 中で速度 $11 \mu\text{m/s}$ での摩擦で得た実験結果を図3(a)に示す。電荷量の急激な下落は放電が起きたことを示し、放電後から次の放電までの間では、摩擦の経過時間に比例して電荷が蓄積する過程を確認することができた。

図3(a)の帯電・放電サイクルの測定と同時に接触点付近で発生する放電の発光画像測定を行った。これまでの実験では、接点付近で起こる発光の空間分布は断続的

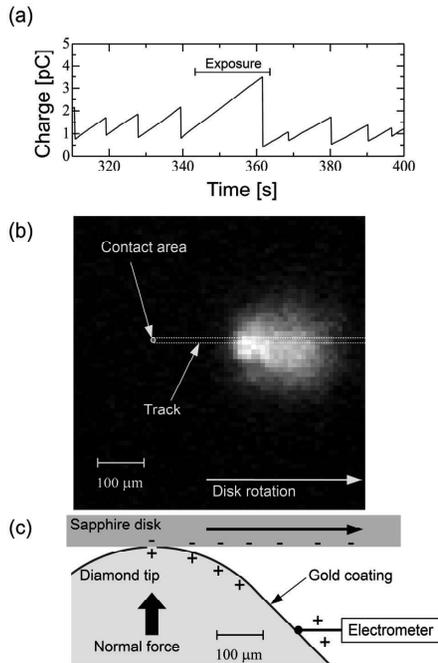


図3 (a) ネオンガス中 (1.3×10^4 Pa) 摩擦での帯電・放電サイクル, (b) 放電発光の空間分布, 及び (c) 接点の断面図.

Fig. 3 (a) Charge-discharge cycle during friction in Ne gas at 1.3×10^4 Pa, (b) two-dimensional spatial distribution of a micro-gap discharge, and (c) cross-section of the pin-disk contact.

に起こる放電発光の総和を測定し, 放電特性等を議論してきた⁹⁾が, 今回の実験では, 放電が起きた直後にカメラのシャッターを開け, 次の放電の直後にシャッターを閉じることで1回の放電の発光空間分布を測定することに成功した. 図3(a)の362 s付近で起きた放電について, CCDカメラで撮影した発光の空間分布を図3(b)に示す. 放電は摩擦によって帯電したサファイアとダイヤモンド(金薄膜)のマイクロギャップで発生していることを確認できた. 図3(b)の摩擦トラックに沿った断面の模式図を図3(c)に示す. 接点と発光の位置から, 放電したマイクロギャップの大きさは30-150 μm と推定できる. 測定した空間分布は従来の多数回の放電発光を重ねた画像計測結果とほとんど変わらず, この測定から, 1回のマイクロギャップ放電の発光が摩擦トラックの幅を大きく超えて広がる分布を持つことが明らかになった. 放電発光が広がる理由は, 図2のグラフ-(ii)の結果も考え合わせると, サファイア表面の負の電荷が摩擦トラックに留まらずに拡散して広がっているためとも考えられる.

3.3 電荷分離のすべり速度依存性

真空中での摩擦帯電量の摩擦速度依存性を図4に示す. 真空中ではマイクロギャップ放電は起きず, ディスクが1回転を終えるまでは摩擦距離に対して一定の割合で電荷量が増加し, 2周目以降では帯電量が飽和した. 摩擦

距離あたりの電荷の発生量を速度 10^{-5} から 0.14 m/s の範囲で測定した結果を図5(a)に示す. 画像で計測した接点の直径 ($10 \mu\text{m}$) を摩擦トラックの幅とし, これに摩擦距離あたりの電荷の発生量を掛けることで, サファイア表面の電荷密度の大きさを計算し, 右側の縦軸に示した.

図5(a)に示した真空中での摩擦帯電量(電荷密度)の測定結果は, 速度が大きいくほど増加することを示している. しかし, 10^{-5} m/s と 0.1 m/s の実験結果を比べても, 電荷密度の値は2~4倍程度の違いしかなかった. 10^{-4} m/s 以下では, 電荷密度は一定の値を取り, 電荷分離が起きなくなることはなかった.

図2のグラフ-(iv)が示すように, 10^4 - 10^5 Pa のネオンガス中では, 摩擦で発生した電荷は放電で99%以上緩和する. そこで, CCDカメラによってある時間内の放電発光総量を測定し, その速度依存性を調べた. 2.5×10^4 Pa のネオンガス中での摩擦における摩擦距離あたりの放電発光強度の速度依存性を図5(b)に示す. 図3(a)に見られる放電した電荷量の大きさと図3(b)で示した放電発光画像の同時測定を11から50 $\mu\text{m/s}$ の速度範囲で行い, 発光量と放電電荷量の関係を求めた. この放電電荷量を摩擦で発生した電荷量と見なし, 摩擦トラックの幅を $10 \mu\text{m}$ として, 発光量から摩擦による電荷分離の電荷密度を計算した結果を図5(b)の右側の軸に示した. 実験の結果, 図5(a)と同様の速度依存性が確認できた.

摩擦速度の増加に伴い, ダイヤモンドの接触部の温度上昇が帯電に与える影響を検討した. 温度上昇の上限を見積もるため, 摩擦接触部から室温のダイヤモンド支持部に至るまでの熱伝導の経路は接触面積 A を底面としたダイヤモンドの厚さ $L = 0.5$ mm の円筒内に制限した. 摩擦速度 v_s は帯電量が増加しはじめた 10^{-1} m/s とし, 荷重 $F_N = 0.1$ N, 摩擦係数 $\mu = 0.1$ をそれぞれ仮定し, ダイヤモンドの熱伝導率には $\kappa = 2,000$ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ を用いて, 摩擦で散逸する全エネルギー ($\mu F_N v_s$) と固体の熱拡散 ($A\kappa\Delta T/L$) との釣り合いから温度上昇を計算した. 接触面の直径を $10 \mu\text{m}$ とすると, 温度上昇は 3.2 K にしかない. したがって, 測定した速度範囲では摩擦による温度上昇は電荷分離に影響していないと考えられる.

次に, 測定結果を再現できる実験式として, 接触で分離した電荷が接触時間に依存して一部が緩和すると仮定して実験結果を考察した. 摩擦中のサファイアとダイヤモンドの接触時間 t は, 接触面の直径 a を摩擦速度 v_s で割ったもので定義した. 摩擦による帯電の電荷密度を以下の式で表す.

$$\sigma = \sigma_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \sigma_2 \quad (1)$$

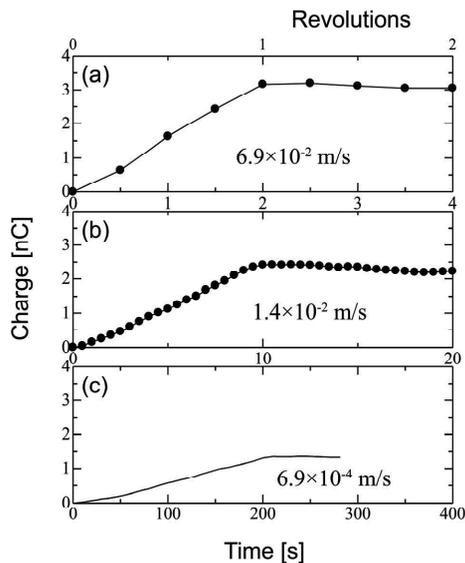


図4 真空 ($\sim 10^{-4}$ Pa) 中での摩擦帯電量の速度依存性
 Fig. 4 Dependence of tribo-electricity generated in a vacuum ($\sim 10^{-4}$ Pa) on velocity of friction.

$$t \equiv \frac{a}{v_s} \tag{2}$$

ここで、 σ は測定した電荷密度、 σ_1 は緩和してなくなる電荷量の密度、 σ_2 は緩和しない電荷の密度、 τ は緩和時間とする。接触直後に分離した電荷密度は $\sigma_1 + \sigma_2$ となる。

実験式を最小二乗法によって求め、図5(a)および(b)にそれぞれ曲線で示した。全体的に見て、近似式は測定した速度依存性の特徴を良く表している。また、カーブフィッティングの結果、緩和時間 τ は(a)、(b)に対してそれぞれ17 ms, 6.1 msとなり、接触面の大きさの不確かさや測定点のばらつきなどから考えて、両者は誤差内で一致したと言える。

常温のサファイヤやダイヤモンドの電気伝導率 K と誘電率 ϵ から計算した時定数(= ϵ/K)はどちらもおよそ $100\text{-}10^4$ sの範囲となり、近似式から得た緩和時間 τ はこれらに比べて数桁小さい。したがって、摩擦による電荷分離は固体全体を通じて帯電緩和するのではなく、界面の電気伝導率に依存して緩和したと推測される。しかし、なぜ一部の電荷だけが緩和するのかなど、不明な点もある。

実験した最小の接触時間 t は約100 μs であった。つまり、ダイヤモンドとサファイヤの摩擦帯電では、接触後の電荷分離は100 μs 以下の時間で起きている。

低速の摩擦では高速時よりも電荷密度が小さくなるのは、気体中での摩擦におけるマイクロギャップ放電による帯電緩和が起こるよりも前に、接触時間に応じた電荷分離の緩和が起きているためと推測できる。この場合、真の接触帯電の電荷密度はこの緩和が起こる前の $\sigma_1 + \sigma_2$ となる。ダイヤモンドとサファイヤの摩擦では、接触到

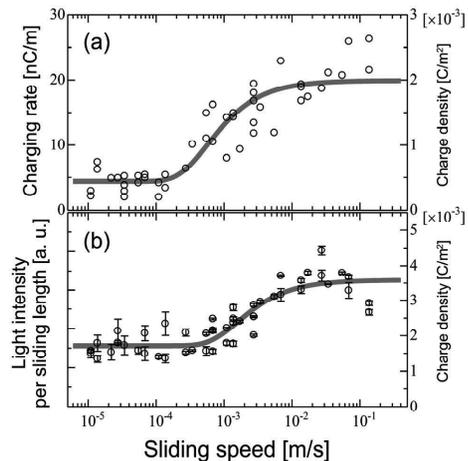


図5 摩擦帯電の速度依存性。(a) 真空 ($\sim 10^{-4}$ Pa) 中での電荷量測定と (b) 放電発光量の測定。
 Fig. 5 Dependence of tribo-electricity on sliding speed obtained by (a) measurement of charge in a vacuum ($\sim 10^{-4}$ Pa), and (b) evaluation from light intensity of discharge.

による電荷分離の密度の大きさは 10^{-3} C/m²のオーダーであると言える。

3.4 電荷分離の気体圧力依存性

摩擦速度11 $\mu\text{m/s}$ で帯電量を測定すると、図3(a)で見られるような電荷分離とマイクロギャップ放電が繰り返される過程を観測できる。気体が放電前の電荷分離過程に与える影響を調べるために、放電と放電の間で測定できる電荷分離の時間変化(帯電速度, C/s)の気体圧力依存性を調べた。図6(a)にネオンガスの圧力を変えたときの電荷量測定の結果を示す。

どの測定でも摩擦開始直後から5秒ぐらいまでのエレクトロメータに取り込まれた電荷量の時間変化は10秒後以降での変化率と比べ、やや小さかった。図6(a)のグラフ-(iii)のように、放電後に電荷量が0付近まで減少する場合は、そこからの傾きは緩やかに増し、数秒後に帯電速度は一定となる傾向が見られた。この原因は負に帯電したディスク面がダイヤモンドピンの金表面に対して電荷を誘導するためと考えられる。静電誘導の影響はピンに近いディスク表面の負の帯電によるところが大きいはずなので、時間が経って傾きが一定になったときの帯電速度を求め、単位摩擦時間あたりの静電気発生量とした。

図6(a)で示したような測定を様々な気体圧力に対して行い、帯電速度の気体圧力依存性を調べた。図6(b)にネオンガス雰囲気での測定結果、(c)に窒素ガス雰囲気での測定結果を示す。ネオン 10^3 Pa以下では帯電速度は一定であったが、 $10^3\text{-}10^5$ Paでは圧力が増加するにしたがって帯電速度は減少し、大気圧付近では真空中の約半分になった。一方、窒素ガス中では、全測定圧力下ではほぼ一定であった。

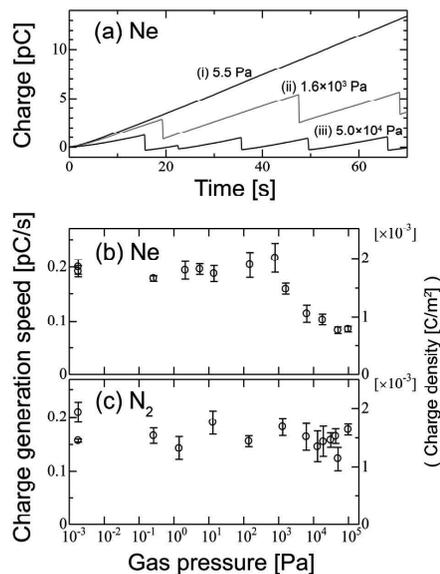


図6 (a) 摩擦帯電量のネオン圧力による違いと (b) ネオン、及び (c) 窒素中での帯電率の気体圧力依存性。
 Fig. 6 (a) Generation of tribo-electricity in a pressure-controlled Ne gas ambience and charge generation speed as a function of pressure of (b) Ne and (c) nitrogen gas.

マイクロギャップ放電が起こる前の帯電量は気体圧力に依存して変化し、またそれは気体種にも依存することが分かった。ネオンと窒素で実験結果が異なったのは、気体の放電特性の違いが原因であると考えられる。ネオンガスの火花電圧は窒素ガスよりも低く、また、コロナ放電の開始電界強度も低い。マイクロギャップ放電が起こる前にも気体に依存した別の放電現象による帯電緩和が起きていると考えられる。この放電は、発光を伴わない暗流のような気体を通じた漏洩電流の可能性がある。

4. まとめ

ダイヤモンドとサファイアの摩擦帯電について、11 $\mu\text{m/s}$ から 140 mm/s までの速度範囲で摩擦による電荷分離を調べた。マイクロギャップ放電による緩和のない真空中での実験結果でも、放電緩和による発光から電荷量を測定した結果でも、摩擦速度の減少に対して帯電量が減少する傾向が現れた。接触時間に応じて分離した電荷の一部が緩和すると仮定して解析すると、実験結果を良く再現でき、10 ms 程度の緩和時間が得られた。これは固体の電気伝導では説明できず、界面を通じた電荷の再結合によって一部の帯電が緩和したためと考えられる。

速度 11 $\mu\text{m/s}$ で摩擦して帯電量を測定すると、一定の電荷分離過程と間欠的に起こるマイクロギャップでの気体放電が繰り返される過程を観測できた。マイクロギャップ放電が起こる前の帯電速度の気体圧力依存性を測定した結果、気体を通じた漏洩電流が起きている可能性が示唆さ

れた。例えば、気体や表面を通じてマイクロギャップ放電以外にも帯電が緩和される現象が存在すると考えられる。

本研究で開発した実験手法を用いて、様々な試料についてリアルタイムに絶縁体と絶縁体の摩擦帯電量を測定し、発光を伴うマイクロギャップ放電に加え、それ以前や真空中で起こる帯電緩和現象について、さらに詳しく研究できると期待される。

参考文献

- 1) J. Lowell and A. C. Rose-Innes: Contact electrification. *Adv. Phys.*, **29** (1980) 947
- 2) A. Wahlin and G. Backstrom: Sliding electrification of Teflon by metals. *J. Appl. Phys.*, **45** (1974) 2058
- 3) F. Nordhage and G. Backstrom: Sliding and rolling electrification of a NaCl-metal system. *J. Electrostatics*, **3** (1977) 371
- 4) S. P. Hersh and D. J. Montgomery: Static Electrification of Filaments: Experimental Techniques and Results. *Text Res J*, **15** (1955) 279
- 5) R. G. Cunningham and D. J. Montgomery: Studies in the Static Electrification of Filaments. *Text. Res. J*, **28** (1958) 971
- 6) Y. Chang, Y. Chiou, and R. Lee: Tribo-electrification mechanisms for dissimilar metal pairs in dry severe wear process: Part I. Effect of speed. *Wear*, **264** (2008) 1085
- 7) R. Elsdon and F. R. G. Mitchell: Contact electrification of polymers. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **9** (1976) 1445
- 8) K. Ohara, J. Electrostatics: Temperature and friction speed dependence of frictional electrification between polymer films. Contribution of molecular motion of polymers to frictional electrification. **4** (1978) 233
- 9) 三浦 崇, 荒川一郎: ダイヤモンド - 水晶表面間のすべり摩擦に起因する雰囲気気体放電発光の観測. *真空*, **45** (2002) 428
- 10) T. Miura and I. Arakawa: Gas discharge caused by triboelectricity around a contact during friction between insulators. *IEEE Trans. Dielect. Elect. Ins.*, **14** (2007) 560
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 三浦 崇, 榎戸一樹, 橋本麻衣, 荒川一郎: 絶縁体のすべり摩擦における気体放電 — 放電発光の時間計測 — 物性研究. **81** (2004) 892