

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：82629

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350489

研究課題名(和文) 静電気災害防止に向けた工業用材料の摩擦電気発生と放電緩和過程の基礎的研究

研究課題名(英文) A fundamental study of charge-discharge process during friction of industrial materials to prevent electrostatic disaster

研究代表者

三浦 崇 (miura, takashi)

独立行政法人労働安全衛生総合研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：80337906

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：金属と結晶の摩擦電気をリアルタイムに測定できる雰囲気制御可能な実験装置を開発し、本質的な摩擦電気の発生量を真空中で測定し、マイクロギャップ放電による緩和過程を気体中で測定した。ステンレスとガラスとの摩擦を真空中で行い、摩擦電気を測定した。この結果、摩擦で発生する静電気の表面電荷密度は $4 \times 10^{-4}$  C/m<sup>2</sup>であった。気体中で摩擦を行うと、マイクロギャップ放電が起き、分離した摩擦電気は緩和された。緩和後に残留する電荷の割合は、アルゴンで最も小さくなり、アルゴンは最も効果的に摩擦電気を緩和して、静電気を減らすことが分かった。

研究成果の概要(英文)：We developed an experimental setup to measure in real time the charge generated during friction between a metal and a crystal material in a vacuum chamber in order to reveal the absolute quantity of the initial charge separation in a vacuum and the relaxation processes, e.g., micro-gap discharge, in a gas ambience. Charge generation due to friction between stainless steel and fused quartz in a vacuum was measured, and it was found that the density of the charge separation at the friction contact was  $4 \times 10^{-4}$  C/m<sup>2</sup>. In experiments in ambient gas, reduction of the separated charge caused by microgap gas discharge was observed. The residual rate of the charge, which is the ratio of charge accumulation in an ambient gas to that in a vacuum, in argon ambient gas was small, and it seemed to be effective for the relaxation of generated static electricity due to friction between solids.

研究分野：物理学

キーワード：摩擦電気 放電

### 1. 研究開始当初の背景

静電気災害のメカニズムを原因から災害に至るまでの順に書き出すと、A)摩擦、B)摩擦電気の発生、C)初期放電(緩和)、D)蓄電、E)火花放電、F)着火・爆発、という複雑なプロセスになっていると考えられる。これまでの研究では D)蓄電より後の過程の実験的研究が中心であり、プロセス初期段階にあたる A)摩擦から C)初期放電(緩和)までの部分は国内外を含め、災害防止の観点からはまだ着目されていなかった。

### 2. 研究の目的

(1) 固体と固体の摩擦において、静電気の発生と放電のサイクルがどのように起きているかを実験により明らかにする。

(2) 真空中での摩擦実験から材料間の摩擦で本来発生する電荷量を定量的( $C/m^2$ )に測定する。

(3) 気体中での摩擦実験から放電による電荷の緩和量を定量的に測定し、初期放電が摩擦による最終的な静電気をどのくらい減らすのか(残留率,%)を定量的に測定する。

### 3. 研究の方法

実験で使用する測定装置は、固体試料のすべり摩擦はピンオンディスク法(回転するディスクの面にピン状の試料を押しつける方法)に基づいている。これは研究代表者がこれまでに改良を重ねてきたもので、測定したい金属をピンとして設置し、ピンに接続したエレクトロメータで摩擦電気の発生量を定量的に測定する仕組みである。透明なディスク材料に対し、摩擦の接触面積を光学的に計測し、単位面積あたりの電荷分離量を正確に測定する。

加えて、実験装置は任意のガス環境を作ることができ、圧力も真空中から1気圧まで制御することができる。

摩擦実験材料の幅広い選択性と気体雰囲気自由に変更できる特徴を活かして、固体試料の摩擦電気特性と気体の持つ帯電緩和特性をそれぞれ分析する。

### 4. 研究成果

初歩的な測定として、各種の金属板と本実験のディスクとして用いたPET板(20×20mm、厚さ1mm)を大気中で摩擦し、ファラデーケージで帯電量を測定した。その結果を[金属試料, PETの平均電荷密度( $C/m^2$ )]の書式で示すと、[SUS304,  $-1 \times 10^{-6}$ ],[Au,  $+5 \times 10^{-6}$ ],[Pt,  $+5 \times 10^{-7}$ ],[Cu,  $-3 \times 10^{-6}$ ],[Ti,  $-3 \times 10^{-6}$ ],[Ta,  $-5 \times 10^{-6}$ ]となった。

大気中摩擦によるPETの帯電量をファラデーケージで測定すると、平均電荷密度は $10^{-7} \sim 10^{-5} C/m^2$ 程度にとどまることが確認された。摩擦後の試料を引き離す際、おそらく放電(断続的な音が鳴ることもある)が起こるためである。

本研究課題での実験方法で得られた結果

を図1から5に示し、説明する。

図1にステンレスの球面ピン(先端曲率0.5mm)試料とPETのディスク試料の摩擦によってステンレス側に発生した電荷の測定結果を示す。接触面は円形で直径(摩擦トラックの幅w)は50 $\mu m$ であった。(a)(b)(c)のグラフはそれぞれ異なる気体(乾燥空気)圧力で測定した結果を示している。いずれの実験でもステンレスが正に帯電した。下横軸(回転数)が1より大きい範囲は、ピンが帯電面と再接触している。真空中の実験結果(図1(a))では、再接触によって電荷量の測定値が増えていないため、PETの摩擦面の電荷密度は飽和、もしくは平衡に達したと考えられる。1周で到達した電荷量からPET表面の負電荷の密度は $-5.4 \times 10^{-4} C/m^2$ となった。乾燥空気を導入して実験を行うと、 $10^3 \sim 2.5 \times 10^4 Pa$ の範囲では、図1(c)の結果と同様に、摩擦に伴う電荷量の上昇と0.5秒のサンプリング周期以内に急激に電荷量が減少するサイクルが明瞭に観測された。これは放電によって電荷分離が緩和することを示している。

乾燥空気 $10^5 Pa$ (~大気圧)での実験結果(図1(b))によると、帯電量は摩擦にともなって増加したため、真空中と同じくPETの表面は摩擦によって負に帯電したが、帯電量は真空中での値を下回った。これも放電による緩和のためと考えられる。

電荷分離を緩和する放電の発生場所を調べるために、放電発光を接触面の反対側からPETディスクを通してCCDカメラで撮影した。図2(a)に発光測定時の摩擦中の電荷分離と放電緩和の様子を示す。接触部分の幾何学的構造と図2(a)で観測された12回の放電の発光分布を図2(b)と(c)にそれぞれ示す。図2(c)で示した発光分布は図2(b)の下方から撮影したもので、それぞれの図は同じスケールで描かれている。

図2(a)の電荷分離過程の傾き(電荷量の時間変化)と摩擦速度から、PET表面の電荷密度を計算すると、 $-4.5 \times 10^{-4} C/m^2$ となった。これは真空中での摩擦で測定した帯電密度とほぼ同じである。つまり、摩擦によって分離した電荷の緩和は、マイクロギャップ放電が主な原因である。

金とPETの摩擦電気について、ステンレスと比較するために実験した。金とPETの摩擦による電荷分離の測定結果を図3に示す。ピンは、直径0.2mmの金線を折り曲げ、曲面になった部分をPETとの接触点とした。ステンレスの場合とは異なり、金による摩擦でPET表面は正に帯電した。その大きさは $+1.0 \times 10^{-4} C/m^2$ であった。

体による帯電緩和効果の違いについて研究した。図4に実験結果を示す。窒素、アルゴン、乾燥空気の0.4気圧下では、摩擦電気は断続的に起こる初期放電によって消失し、正味の蓄積量は摩擦電気の発生量に対して5%以下であった。湿気を含んだ室内空気を装

置内に導入した実験では、明確な初期放電による緩和の信号が得られず、真空中での値よりも低くはあるが、25%程度の電荷は表面に残留した。75%が消失した原因も不明確である。

1気圧下では、アルゴンでは摩擦電気の1%以下まで緩和したのに対し、他の気体では、28から40%程度にしか減少しなかった。特に、乾燥空気は湿気を含んだ空気よりも緩和効果が低く、摩擦電気の40%が表面に残る結果となった。

結論として、アルゴンは初期放電によって摩擦電気を緩和する効果が一番高く、これはおそらく、コロナ放電が起きやすいという性質と関係が深いと予想される。

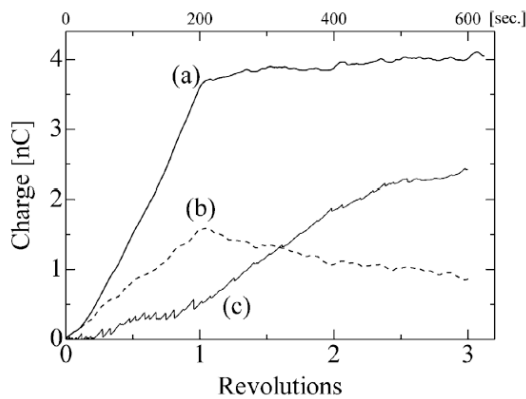


図1 ステンレスと PET の摩擦電気 . (a)真空中, (b)大気圧の乾燥空気, (c) 0.25 気圧の乾燥空気 (引用文献 )

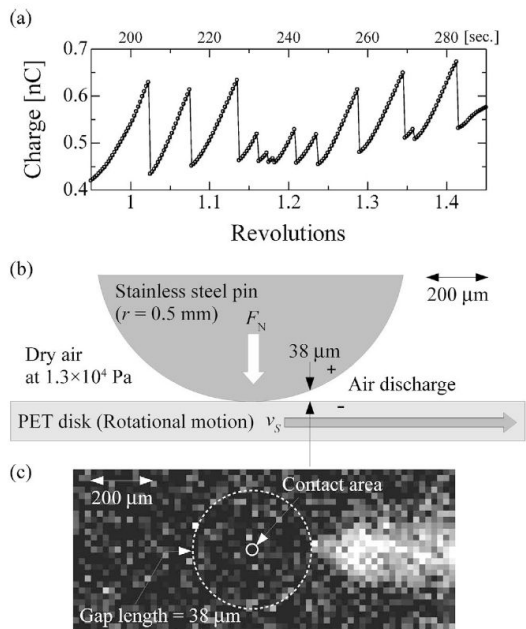


図2 (a)摩擦電気の発生と放電緩和過程 . (b)試料の幾何学的構造 . (c)放電発光分布 . (引用文献 )

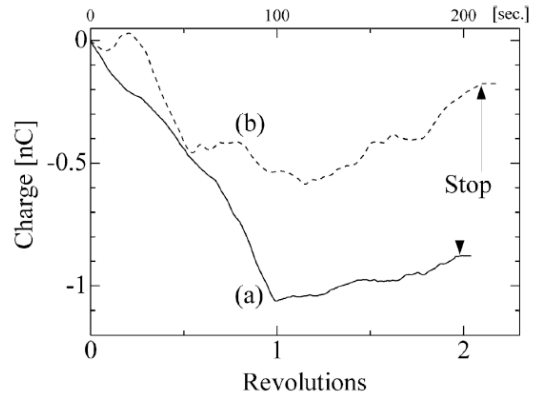


図3 金と PET の摩擦電気 (引用文献 )

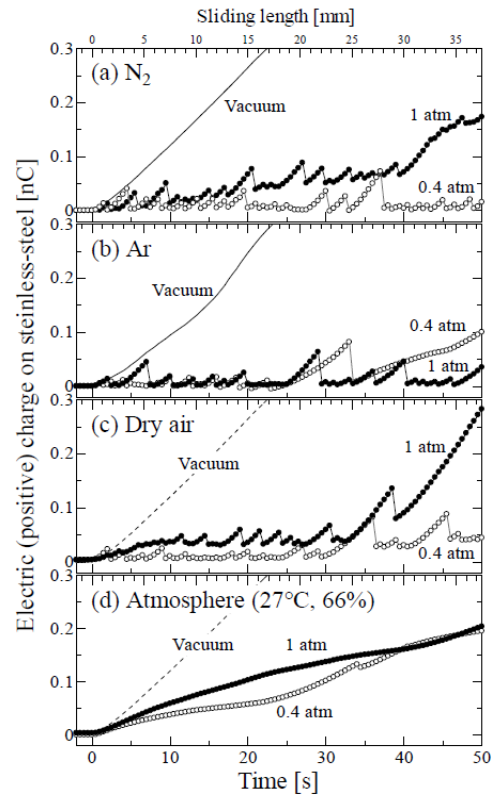


図4 気体雰囲気による放電緩和効果の違い (引用文献 )

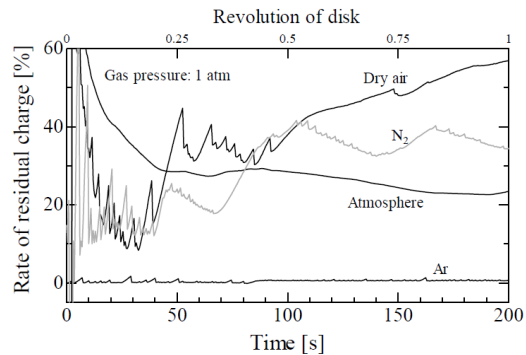


図5 大気圧での放電緩和後の残留電荷量の割合 . 小さい程帯電が残っていないことを表す . (引用文献 )

<引用文献>

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 巻, 2014, pp.167-170,  
Takashi Miura, Observation of charge separation and gas discharge during sliding friction between metals and insulators, Journal of Physics: Conference Series, 646 巻, 2015, 012057(4 ページ)

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

Takashi Miura, Observation of charge separation and gas discharge during sliding friction between metals and insulators, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, 646 巻, 2015, 012057(4 ページ)

<http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/646/1/012057>

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, 査読有, 57 巻, 2014, pp.167-170,

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jvsj2/57/4/57\\_13-PR-093/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jvsj2/57/4/57_13-PR-093/_article/-char/ja/)

[学会発表](計4件)

Takashi Miura, Observation of charge separation and gas discharge during sliding friction between metal and insulator, Electrostatics 2015, 12-16 April 2015, Southampton Solent University, Southampton, UK. (サウサンプトン, イギリス)

Takashi Miura, Study of Charge Separation and Relaxation during Friction between Metal and Plastics in a Vacuum and in Air, AVS 60th International Symposium & Exhibition, October 27-November 1, 2013 in Long Beach, CA, USA. (カリフォルニア, アメリカ合衆国)

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 (28Ga02), 第54回真空に関する連合講演会, 2013年11月26-28日, つくば国際会議場

三浦崇, マイクロギャップ放電による静電気緩和の気体種依存性 (18a-PB1-1), 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 2014年9月17-20日, 北海道大学

[その他]

ホームページ等

<http://www.jniosh.go.jp/mail-mag/2014/6>

4-column.html

6 . 研究組織

(1)研究代表者

三浦 崇 (MIURA, Takashi)

独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所・電気安全研究グループ・研究員

研究者番号 : 80337906