Measurement of Surface Charging on Solid Insulation Materials in Vacuum

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/45364

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



博　士　論　文

（要旨）

真空中における固体絶縁体の帯電計測

Measurement of Surface Charging on Solid Insulation Materials in Vacuum

金沢大学大学院自然科学研究科

数物科学専攻

学籍番号　1223102013

氏名　森田 裕

主任指導教員名　鎌田 啓一 教授

提出年月　2016 年 1 月

Summary

There is intimate relation between discharge and electric-charging on the solid insulator in vacuum. Therefore, a lot of research about them has been done for long years. However, they haven't been investigated in detail. To investigate the electric-charging characteristics of an insulator and relation between electric-charging and discharge in vacuum, a system for measuring the potential distribution on the surface of an insulator in vacuum was developed. And the system was used to measure potential distributions on smooth and rough surfaces of several glass plates. During micro discharge caused by partial discharge of the electrode, in the potential distributions of both the smooth and rough surfaces, a negative peak near the HV electrode and a positive peak near the GND electrode were observed. Moreover, the positive electric field on the rough surface is lower than that on the smooth surface during micro discharge. On the other hand, the measured potential distributions after surface discharges indicate that compared to discharges on the rough surface, the discharges on the smooth surface tend to occur at lower positive potential. These potential distributions are supposed to be caused by scattering and attachment of electrons drifting on the surface. Sandblasting was applied for roughening the insulators, and it is considered to be suitable for mass production of the vacuum-insulated DC high-voltage systems because it is low cost and easy to perform.

1. 序論

真空中での放電は古くから研究されているが，そのメカニズムが未解明であることも多い。特に固体絶縁物の帯電や沿面放電現象については現象そのものを観測することが難しい。電子・荷電粒子ビーム装置ではその構造上，真空中でのビームの生成，加速，収束等を目的とした高電圧電極が真空中に置かれるため，真空を介した電気絶縁が必須となる。

本研究では真空中での放電現象の解明や真空絶縁機器の性能向上を目指し，真空中の固体絶縁物の電位を計測する装置を開発すること，さらに，ガラス表面に微小な凹凸を付けて粗面化した場合の表面電位分布を測定し，絶縁体の沿面放電と帯電の関係を明らかにすることを目的とする。

1.1 背景

真空による絶縁は電圧部を支持する少量の固体絶縁と真空空間の組み合わせで構成されることから、環境負荷が小さく，環境対応技術として注目されている。例えば，従来は SF6 ガス絶縁方式が主流であった遮断器の分野では、さらに高い電圧においても真空遮断器に代替されるようになりつつある。

X 線管，電子顕微鏡，イオンビーム装置，電子線描画装置，加速器，ブラウン管，真空管等の電子・荷電粒子ビーム応用機器については，真空中でのビームの生成，加速，収束等を目的とした高電圧電極が真空中に置かれるため，真空を介した電気絶縁が必須となる。宇宙機に関しては，運用される環境が大気圏外であるため，真空中での絶縁が必要となる場合が多い。例えば，人工衛星に搭載される太陽電池パネルでは，太陽風による荷電粒子を原因とした帯電や，過酷な温度環境による絶縁劣化等が課題である。

1.2 真空沿面放電の特性

真空中の沿面放電も空気中の沿面放電と同様に三重点での電界集中に伴う電子放出が発端になりやすい。ただし，真空中では空気分子が少なく，電子の平均自由行程が長く，電界により一旦加速された電子は大きなエネルギーになる。加速された電子が絶縁体表面に衝突すると二次電子を発生させたり，電子が絶縁体表面に吸着されたりし，絶縁体表面を正あるいは負に帯電させる。図 1 にその概念図を示す。

ここでは電子の放出点を陰極と絶縁体の接合部の微小な隙間である三重点とする。この隙間には非常に高い電界が存在し，電子が電界放出される。放出された電子は絶縁体の表面へ衝突を繰り返しながら，陽極に向かって加速される。加速された電子はエネルギーが高

く，絶縁体に衝突すると二次電子を発生し，電子の数は増倍するとともに，絶縁体表面は正に帯電する。二次電子が増倍する現象を二次電子なだれ(SEEA, Secondary Electron Emission Avalanche)と呼ぶ。1 個の電子の衝突により発生する二次電子の個数は二次電子放出係数(Secondary Electron Emission Coefficient)と呼ばれ，物質により異なり，衝突する電子のエネルギーにより概ね図 2 のような傾向を示す。二次電子放出係数の測定結果の典型例を表 1 に示す。衝突する電子の初期エネルギーE が低いと二次電子放出係数δは 1 以下であり，二次電子の個数は衝突する電子の個数より少ない。E が大きくなるに従い二次電子放出係数δは増加し，最高値となるが，さらに E が大きくなるとδは減少する傾向がある。

二次電子放出係数が 1 以上の領域に相当するエネルギーを有した電子は絶縁体との衝突により 1 個以上の二次電子を発生させ，絶縁体は正帯電する。正帯電が進展すると，発生した二次電子がクーロン力により正帯電部分に引き戻される力が大きくなり，陽極に向かう電子は減速される。したがって，この二次電子なだれはある平衡状態に達する。

二次電子放出係数が 1 以下の領域に相当するエネルギーを有した電子では，上記と逆の現象が発生し，二次電子が発生せずに負帯電となるが，電子が負帯電部分と反発する力が大きくなり，やはり平衡状態に落ち着くことになる。

上記のように，理論的には二次電子なだれが平衡状態に落ち着くとこれ以上に電子や帯電が増えることがなく，電極間を短絡するフラッシオーバ等の沿面放電には至らない。しかし，絶縁体表面には吸着した気体が存在し，二次電子なだれの電子によって脱離した気体分子により低真空の層が形成され，放電電圧が下がる。さらにこの低真空の層が十分に広ければ電極間を短絡するフラッシオーバが発生する。このフラッシオーバが真空中の沿面放電の最終形態である。したがって，絶縁体の帯電と沿面放電は密接な関係がある。

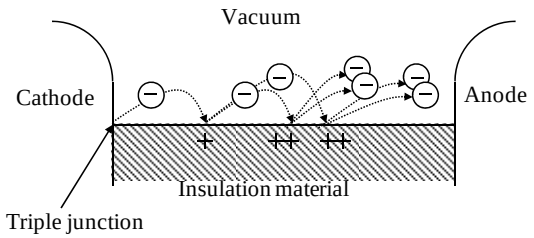


図 1　絶縁体表面の帯電を伴った二次電子発生

陰極(Cathode)と絶縁体(Insulation material)が接する三重点(Triple junction)から発生した電子は絶縁体に衝突すると二次電子を放出しながら陽極(Anode)に向かって移動する。同時に絶縁体には正帯電が発生する。

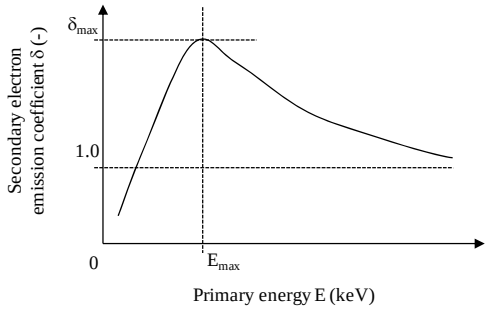


図 2　二次電子放出係数の典型例

1 個の電子が物質に衝突した際に発生する二次電子の平均個数を二次電子放出係数δ(Secondary electron emission coefficient)と呼ぶ。δは電子の初期エネルギーE(Primary energy) によって大きく変化する。

1.3 課題

一般的に真空中の固体絶縁体での沿面放電電圧は，真空を介した電極間の放電電圧より低くなることが多い。このことは真空絶縁機器の耐電圧は電極を支持する絶縁部材の性能によって決まることを意味する。したがって，真空絶縁機器の高電圧化による高性能化，絶縁距離短縮による小型化，絶縁体の長寿命化等を実現するためには，真空中の沿面放電現象を解明する必要があると考えられる。沿面放電現象は非常に複雑な現象である。特に，X 線管，電子顕微鏡，イオンビーム装置，電子線描画装置，加速器，ブラウン管，真空管等の電子・荷電粒子ビーム応用機器については，絶縁体の放電電圧がその性能を左右し，さらには帯電がビームの偏向や微小放電等に関するビームの質に影響を与える。帯電と沿面放電電圧の関係を明らかにすることは重要な課題である。

1.4 本研究の目的

本研究では真空中での放電現象の解明や，真空絶縁機器の性能向上を目指し，真空中の固

体絶縁物の電位を計測する装置を開発すること、その応用として，X線管の絶縁体を想定してガラス表面に微小な凹凸を付けて粗面化した場合の表面電位分布を測定し，絶縁体の沿面放電と帯電の関係を明らかにすることを目的とする。

2. 真空中表面電位計測装置の開発

この章では新たに開発した真空中表面電位計測装置を説明する。この装置は真空中での試料への電圧印加と帯電電位の計測を目的とし，電圧印加用として直流高電圧電源，帯電電位計測用として非接触表面電位計，および真空容器を備える。非接触表面電位計のプローブは真空中で任意に移動でき，試料の表面電位を自動的に測定可能である。

2.1 装置の概要

開発した真空中表面電位計測装置を図 3 に示す。本装置は真空中での固体絶縁体の帯電に関する実験を行うため，下記の特徴を有する。

① 非接触表面電位計による真空中での帯電電位計測： 測定電圧±20kV
② 絶縁体表面を計測する電位計プローブの移動機構： 最大移動距離 60mm
③ 実験状況を観測できるガラス製真空容器： 最高到達真空度 3×10^{-4}Pa
④ 直流高電圧電源による試料への電圧印加： ±200kV
⑤ 電位計の移動制御と電位計測の自動記録： PC による制御システム

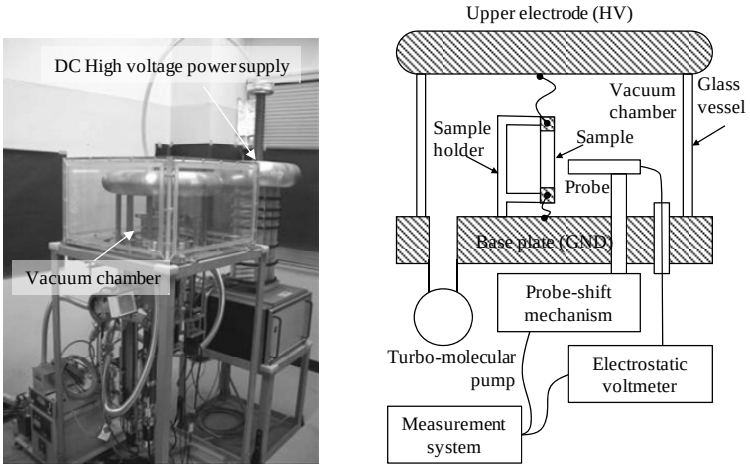


図 3 真空中表面電位計測装置(左：写真，右：計測部の概要図)

[左]前方は真空中での試料の電位を計測する真空容器(Vacuum chamber)をはじめとした計測部，後方は DC±200kV を発生する直流高電圧電源(DC High voltage power supply)である。
[右] 測定部は真空容器(Vacuum chamber) ，表面電位計(Electrostatic voltmeter)，プローブ移動機構(Probe-shift mechanism)等から構成される。

3. 電位分布測定

固体絶縁体の表面凹凸と帯電・放電の関係を解明するために，下記の 3 種類の測定を行った。

3.1 目的

(1) 電圧印加中の電位分布測定
表面の凹凸により放電特性が異なるという先行研究の報告から，帯電による電界が放電に影響を与えている可能性が高いと考えられ，第一ステップとして，表面に凹凸を施した板状ガラス試料に電圧を印加し，その状態で表面電位を測定・評価することとした。

(2) 微小放電による帯電の電位分布測定
試料に電圧を印加してから電源を OFF し，電極を接地電位にした後に表面電位を測定する。この方法では電極間電圧による電位を除くことができるので，帯電によ

る電位分布のみを測定することが可能である。帯電の発展と減衰における時間変化を測定する。

(3) 放電による帯電の電位分布測定
帯電と放電の相関関係を評価する。帯電を与える手段として，あらかじめ放電を起こし，試料に二次電子なだれによる帯電，あるいは電離した吸着ガス分子の残留による帯電を利用することとした。具体的な試験の手順としては，試料に電圧を印加し絶縁体の表面で放電させ，帯電を生成した後，帯電電位を測定し，さらに放電させる，という連続的な試験方法で帯電と放電の相関関係を評価することとする。

3.2 電圧印加中の電位分布測定

3.2.1 測定方法

図 4 に今回の測定に用いた試料の構成を示す。試料は大きさが 70mm×50mm×2mm の板状のホウケイ酸ガラス(パイレックス®)である。試料は 3 種類を準備した。試料 A はホウケイ酸ガラス板そのままの平滑な表面である。試料 B は直径数μm のシリカ粒子を低融点のバナジウム系ガラスペースペーストでホウケイ酸ガラス板に接着したものである。試料 C は表面をサンドブラストで粗面化した板ガラスである。試料には銀ペーストを塗布し、電極を形成した。電極先端では電界集中により電極間の短絡に至らない部分放電の発生が予想され，電子の供給源ともなる。試料の電極間に直流高電圧を印加し、試料より 5mm 離した静電電位計のプローブを長手方向に約 2.5mm/s で走査することにより、試料表面の電位分布を測定した。測定時の真空度は 10^{-3}Pa 以下である。

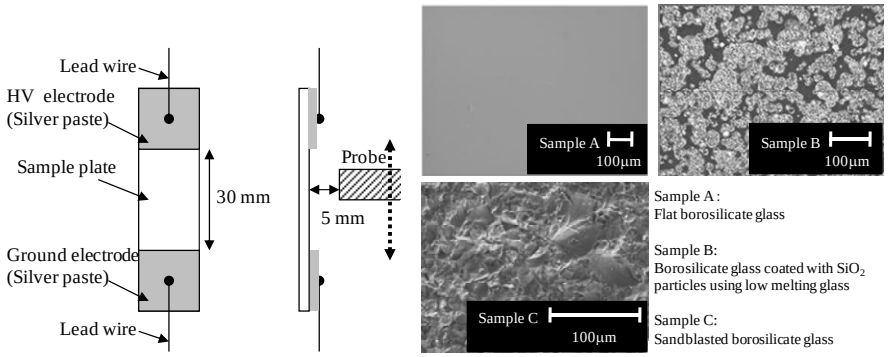


図 4　測定用試料(左)と試料表面(右)

[左]平板ガラス (Sample plate) に銀ペースト(Silver paste)の塗布により高圧電極(HV electrode)，接地電極(GND electrode)を構成する。[右]各試料の表面観察結果を示す。

3.2.2 測定結果

素材そのままの平滑な表面である試料 A について、真空中で直流電圧を印加した場合の表面電位分布の測定結果と計測結果を換算した電界分布を図 5 に示す。高圧電極には-2、-4、-10kV を約 10 分印加した。便宜上、電界の正負を逆転して示している。

印加電圧が低い-2，-4kV の場合、電極間の電位分布は直線に近く、電位の傾きである電界分布もほぼ一定である。一方、印加電圧が-10kV になると、電位分布は電極間で大きく屈曲することが判明した。電位分布は正の方向に屈曲しているため，この箇所では絶縁体の正帯電が示唆される。

図 5 では電界分布にスパイク状の複数のピークが見られるが、これはプローブ移動機構によるノイズであると判明したため、電界分布はこのスパイク状のピークを除いた値で評価することにする。

-10kV 印加時では電界は約 0.70kV/mm であり，-10kV 印加時には高圧電極側の領域で電界が増加している。この傾向は他の試料も含め，複数の測定により再現性があることを確認している。

図 6 に試料 B の電位と電界分布を示す。-10kV 印加時においては、試料 A と比較すると電

位分布の屈曲が小さく、最大電界は 0.40kV/mm に小さくなっている。図 7 に試料 C の電位と電界分布を示す。いずれの傾向とも試料 B とほぼ同様であり、-10kV 印加時の最大電界は 0.42kV/mm である。

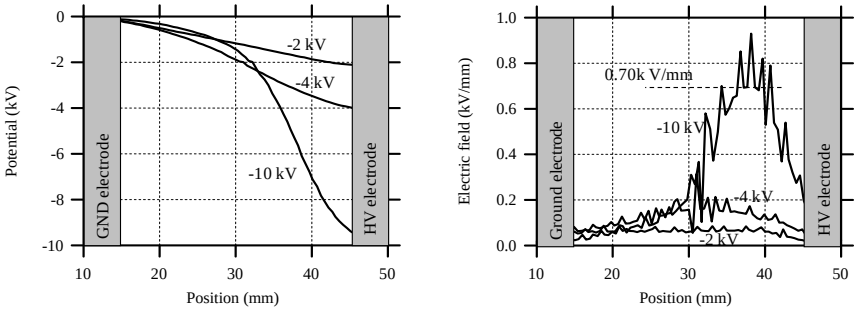


図 5　試料 A(平滑ガラス)の表面電位分布(左)と表面電界分布(右)

-10kV 印加時には電位分布が屈曲している。-10kV 印加時の最大電界は 0.70 kV/mm である。

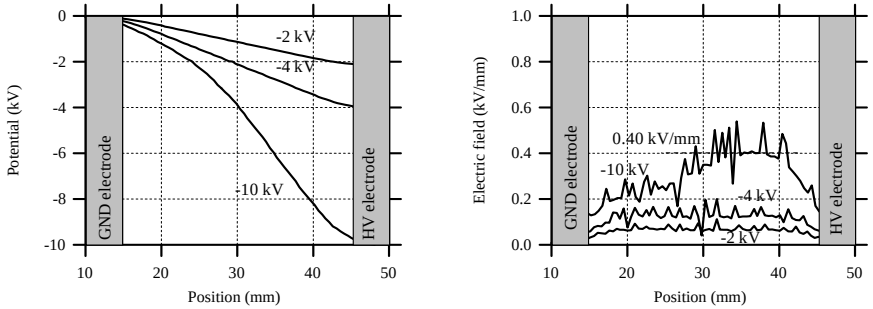


図 6　試料 B(シリカ粒子接着)の表面電位分布(左)と表面電界分布(右)

電位分布は屈曲していない。-10kV 印加時の最大電界は 0.40 kV/mm で，試料 A より小さい。

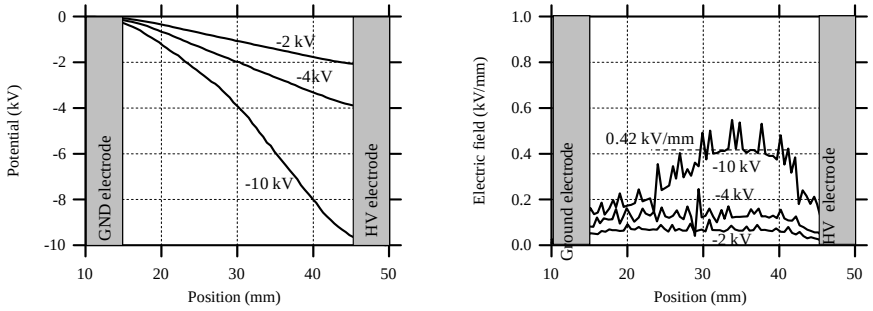


図 7　試料 C(サンドブラスト粗面化)の表面電位分布(左)と表面電界分布(右)

電位分布は屈曲していない。-10kV 印加時の最大電界は 0.42 kV/mm で，試料 A より小さい。

3.3 まとめ

(1) 真空中でホウケイ酸ガラス試料に電圧を印加し，表面の電位分布を測定した。
(2) -10kV を約 10 分間印加したところ，平滑な試料では電極間の電位分布が屈曲する。これは屈曲のある箇所で試料が正帯電したことによると考えられる。
(3) 凹凸を付けた試料では電位分布の屈曲の度合いが小さくなり，最大電界が小さくなる。これらより表面の凹凸は帯電を抑制する働きがあると考えられる。

3.4 微小放電による帯電の電位分布測定

3.5 測定方法

試料に電圧を印加してから電源を OFF し，電極を接地電位にした後に表面電位を測定する。

この方法では電極間電圧による電位を除くことができるので，帯電による電位分布のみを測定することが可能である。帯電の発展と減衰における時間変化を測定する。

表面の凹凸による影響を評価するため，測定試料は D~G の 4 種類を準備した。凹凸の度合いを変えるためにサンドブラストの研磨剤の粒度を#2000, #800, #280 と変えて表面を粗面化処理した。表 1 に試料表面粗さ, **エラー! 参照元が見つかりません。**に試料形状を示す。平板状のホウケイ酸ガラス表面に厚さ 70μm の導電性粘着剤付の銅テープを貼り付け電極とした。高圧電極は野球のホームベースのような五角形形状とした。これは五角形の先端では電界が集中するため，ここを起点とした放電を起こしやすくするためである。試験の手順は，絶縁体の表面で放電させ，帯電を生成した後，帯電電位を測定し，さらに放電させる, という連続的な測定である。放電電流は電源の電流リミッタにより 18μA に設定した。測定時の真空度は 10^{-3}Pa 以下である。

表 1 試料の表面粗さ

	Abrasive number	Abrasive particle size (μm)	Arithmetic average roughness, Ra (μm)
D	-	-	0.23
E	#2000	6.7	0.76
F	#800	14.0	0.95
G	#280	48.0	1.44

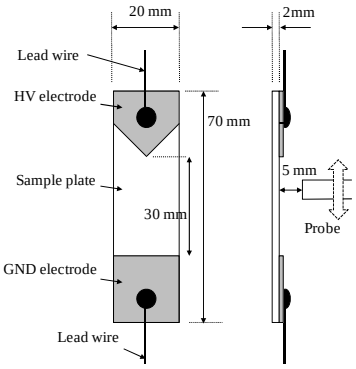


図 8 試料形状

3.6 測定結果

図 9 には平滑な試料 D の連続電圧印加による電位分布測定結果, 図 10 には粗面化した試料 G の連続電圧印加による電位分布測定結果を示す。これらによると，双方とも全体的には負帯電であり，-10kV の電圧印加では 60 分ほどで電位変化は飽和に近づいている。試料 D，G ともに高圧電極から約 10mm(測定位置では 38mm 付近)の位置で-1.5kV 程度の負のピークとなる。試料 D では接地電極近傍で約 0.4kV の正帯電のピークが確認できる。電圧印加後は双方とも負帯電のピークの電位は 60 分から 70 分の 10 分間でほぼ半減する。

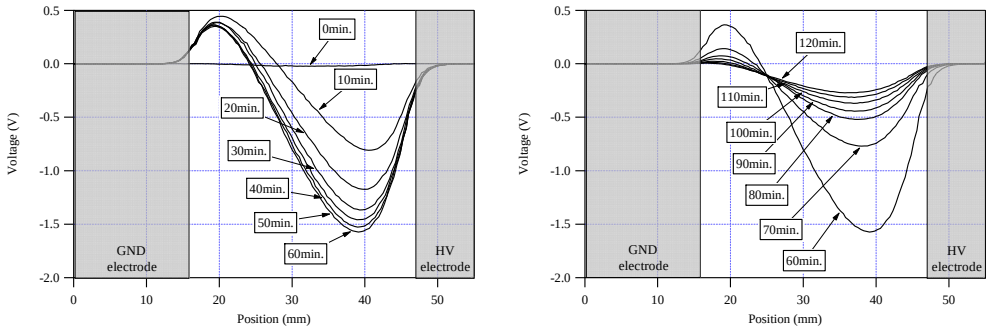


図 9 試料 D(平滑)の連続電圧印加による電位分布測定結果
(左：-10kV 連続印加中，右：電圧印終了後)

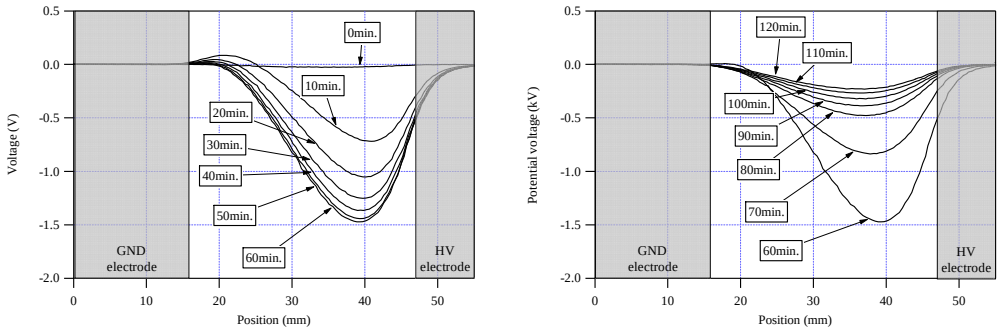


図 10　試料 G(粗面)の連続電圧印加による電位分布測定結果
(左：-10kV 連続印加中，右：電圧印終了後)

試料 D, G ともに高圧電極から約 10mm(横軸では 38mm 付近)の位置で-1.5kV 程度の負のピークとなる。試料 D では接地電極近傍で約 0.4kV の正帯電のピークが確認できる。電圧印加後は双方とも負帯電のピークの電位は 60 分から 70 分の 10 分間でほぼ半減，60 分から 120 分のから 60 分間では 1/6 にまで減衰している。

3.7 まとめ

(1) 帯電による電位のみを測定するため，サンドブラストにより表面凹凸の度合いを変えた試料で一定時間の電圧印加後に高圧電極を接地し，電極間の電位差を除いた後に試料表面の帯電電位を測定した。また，電圧印加を止めた後の電位分布も時間変化も測定した。
(2) 平滑な試料では高圧電極付近では負帯電，接地電極付近では正帯電している。
(3) 一方，表面に凹凸のある試料では高圧電極付近では負帯電しているものの，接地電極付近での正帯電はわずかである。
(4) 平滑な試料，凹凸のある試料の双方とも負帯電のピークの電位は電圧印加終了から 10 分後でほぼ半減，印加終了から 60 分後では 1/6 にまで減衰しており，双方に傾向の大きな違いはない。
(5) この帯電の減衰は電気伝導による電荷の中和であると考えられる。したがって，帯電の減衰がほぼ同等の傾向であるため，双方の電気抵抗は同等であると考えられる。

3.8 放電による帯電の電位分布測定

3.8.1 測定方法

帯電と放電の相関関係を評価する。測定試料は前章と同じく D~G の 4 種類である。帯電を与える手段として，あらかじめ放電を起こし，試料に二次電子なだれによる帯電，あるいは電離した吸着ガス分子の残留による帯電を利用する。具体的な試験の手順としては，試料に電圧を印加し絶縁体の表面で放電させ，帯電を生成した後，帯電電位を測定し，さらに放電させる，という連続的な試験方法で帯電と放電の相関関係を評価する。放電電流は電源の電流リミッタにより 18μA に設定した。測定時の真空度は 10^{-3}Pa 以下である。

3.8.2 測定結果

(1) 放電後の試料中心軸上の電位分布

図 11 に試料 D～G に放電を繰り返した場合の試料中心軸上の電位分布の変化を示す。粗面化した試料 E，F，G では放電の回数に関係なく，電位分布が変化し，電位のピークは最小で 1kV 程度から最大で 5kV 程度まで変化する。一方，平滑な試料 D では概ね放電回数が増えるにしたがって電位が上昇している。電位のピークの位置 30mm の近辺から変化せず，ピークは 4kV 程度まで上昇する。

(2) 帯電電位と放電電圧の関係

図 12 に 1 回前の放電による帯電電位分布の最大値と放電電圧の関係を示す。試料 D は高い帯電電位で低い放電電圧である傾向，試料 G ではその逆で低い帯電電位で高い放電電圧である傾向が見られる。言い換えれば，これは試料表面の凹凸が小さいと帯電による電位が高く低い電圧でも放電しやすくなり，凹凸が大きいと帯電による電位が低く高い電圧で放電するようになる傾向である。

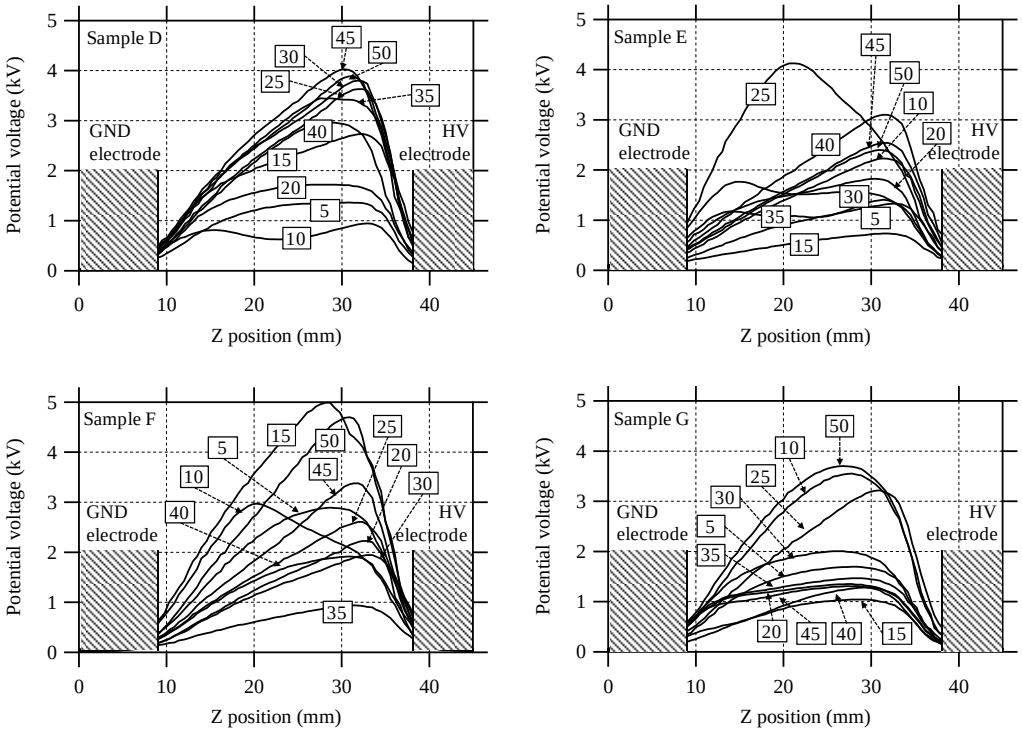


図 11　放電後の試料中心軸上の表面電位分布

グラフでは放電 5 回毎の電位分布を示す。図中の番号は積算放電回数を示す。試料 E，F，G では放電の回数に関係なく，電位分布が変化する。試料 D では概ね放電回数が増えるにしたがって電位が上昇し，最大で 4kV に達する。

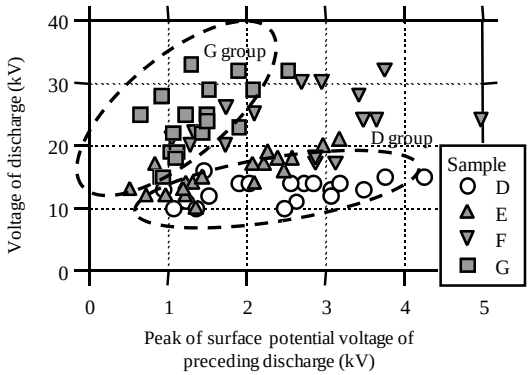


図 12　1 回前の放電による帯電電位と放電電圧の関係

横軸に 1 回前の放電による帯電電位の最大値(Peak of surface potential voltage of preceding discharge)，縦軸に帯電後の放電電圧(Voltage of discharge)を示す。平滑な試料 D は高い帯電電位で低い放電電圧である傾向，粗面化した試料 G ではその逆で低い帯電電位で高い放電電圧である傾向がある。

3.9 まとめ

(1) 試料に電圧を印加し絶縁体の表面で放電させ，帯電を生成した後，帯電電位を測定し，さらに放電させる，という連続的な試験方法で帯電と放電の相関関係を評価した。

(2) 帯電については表面凹凸に関わらず正帯電である。
(3) 平滑な試料では放電回数とともに帯電電位が上昇する傾向があるのに対し，表面凹凸がある試料では放電回数と帯電電位は無関係である。
(4) 平滑な試料では帯電電位が高く，低い電圧でも放電しやすい傾向である。一方，凹凸のある試料では帯電電位が低く，高い電圧で放電する傾向がある。

4. 考　察

4.1 微小放電による帯電メカニズム

電極で微小放電を発生させ，電源を OFF した後，絶縁体の帯電分布を測定した。その結果，帯電の分布については，全体に負帯電しており，表面が平滑である試料では高圧電極側に正帯電する箇所が認められるものの，表面に凹凸を有する試料では正帯電はほとんどない。

これらの帯電は図 13 に示すモデルで説明できる。電極から出た電子は当初はエネルギーが小さく，絶縁体に衝突したとしても二次電子放出係数が 1 以下であり，高圧電極に近いところでは絶縁体は負帯電を示す。平滑な表面であれば電子は散乱されにくく，加速されエネルギーが大きくなり，接地電極側に近いところで絶縁体に衝突すると二次電子を放出し絶縁体は正帯電となる。したがって，電位分布は全体的に負帯電ではあるものの，接地電極に近い領域では正帯電の傾向を示す。

一方，凹凸を有する表面では電子は絶縁体表面で散乱され，加速されずエネルギーが小さいままであり，二次電子の発生も少なく負帯電のままとなる。この場合の電位分布は凹凸を有する絶縁体では接地電極近傍の正帯電が小さくなる。

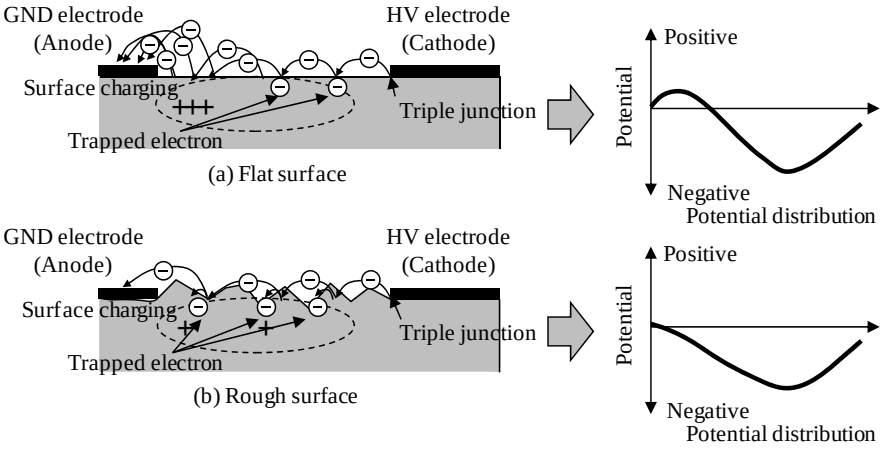


図 13　絶縁体表面上の推定帯電メカニズム(負帯電)
高圧電極に近い領域では加速が十分ではなく，電子は付着により平滑試料，凹凸試料双方で負帯電を示す。接地電極近傍では平滑試料では電子は加速され二次電子が増えることにより正帯電となるのに対し，凹凸試料では凹凸による散乱を受け加速されず二次電子が増えず正帯電が起こらない。

4.1.1 大きな放電による帯電メカニズム

電源リミッタが作動する 18μA での放電を発生させ，その後，絶縁体の帯電分布を測定した結果では，全ての放電電圧は-10kV を超えており，帯電は正帯電である。

平滑な試料 D では試料中心軸上の電位が放電回数とともに上昇する傾向があった。これに対し，粗面化した試料 E，F，G では放電ごとに電位分布が異なる傾向があった。これは絶縁体表面での凹凸により電子が散乱されやすいことが原因と考えられる。さらに，平滑な試料と比べて，凹凸を有する試料の帯電電位の平均値は低く，帯電が抑制されている結果から，帯電の抑制は表面の凹凸による電子の散乱の影響と考えられる。これらより，-10kV 以上での比較的大きな放電による帯電メカニズムを図 14 に示す。

平滑な試料と凹凸のある試料の双方において，放電の際に電極から放出された電子は絶縁体

に衝突して二次電子を放出し，絶縁体が正帯電する。さらにこれらの電子は陽極に向かって加速され，二次電子も増加する。

平滑な試料では凹凸による散乱を受けにくいため，電子は比較的直線的に進むため，放電の回数が増えるに従い，試料中心線上の帯電電位は上昇する。一方，凹凸を有する試料では電子が凹凸による散乱を受けるため，放電ごとに電位が変動すると考えられる。

このため，凹凸のある試料では帯電電位に変動が大きくなる。このようなメカニズムであれば，定性的には帯電の現象は説明ができる。現在のところ仮説あるので，さらに詳細な研究が必要である。

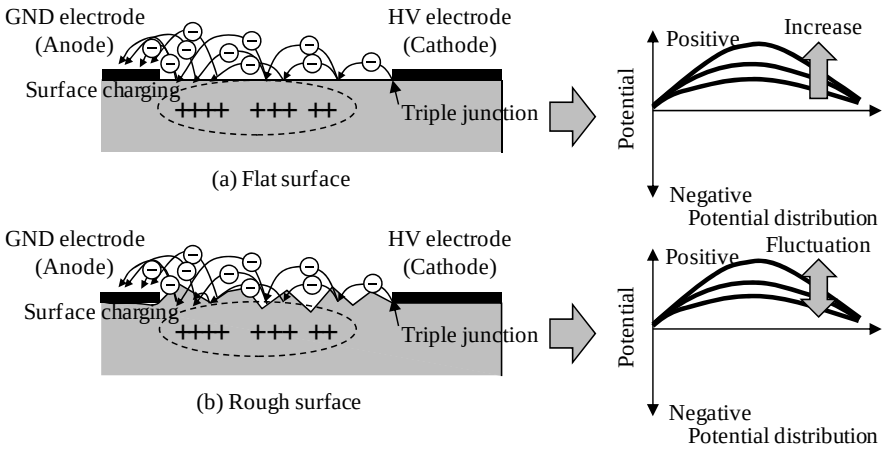


図 14　絶縁体表面上の推定帯電メカニズム(正帯電)

平滑な試料と凹凸のある試料の双方とも放電の際に電極から放出された電子は絶縁体に衝突して二次電子を放出し，絶縁体が正帯電する。平滑な試料では電子は比較的直線的に進むため，放電の回数が増えるに従い，試料中心線上の帯電電位は上昇する。一方，凹凸を有する試料では電子が凹凸による散乱を受けるため，放電ごとに電位が変動する。

5. 結　言

本研究では，X 線管，電子顕微鏡等の電子・荷電粒子ビーム応用機器に課題となる帯電と沿面放電電圧の関係を明らかにするため，真空中表面電位計測装置を開発し，帯電と沿面放電に関する評価と検討を行った。その結果，以下の結論を得た。

(1) 測定電圧±20kV 非接触表面電位計による真空中での帯電電位計測，実験状況を観測できるガラス製真空容器，±200kV の直流高電圧電源による試料への電圧印加を特徴とする真空中表面電計測装置を開発した。

(2) 微小放電による帯電の電位分布測定では，表面が平滑な試料と，表面にサンドブラストにより凹凸を形成した試料に真空中で連続的に電圧印加したところ，全体に負帯電しており，表面が平滑である試料では接地電極側に正帯電する箇所が認められるものの，表面に凹凸を有する試料では正帯電はほとんどないことがわかった。

(3) 放電による帯電の電位分布測定の結果から，1 回前の放電によって生じた帯電電位分布の最大値と放電電圧の関係を評価した。試料表面が平滑であると帯電による電位が高くなり低い電圧でも放電しやすくなり，凹凸が大きいと帯電による電位が低くなり高い電圧で放電する傾向がある。現状では詳細解明には至らないものの，帯電は放電に影響を与えると考えられる。

(4) 絶縁体表面の凹凸により帯電の傾向が変わることが明らかになった。これは凹凸により電子が散乱されたり，付着したりすることによると考えられ，帯電のメカニズムの仮説を立てた。今後はシミュレーション等による実証が必要であると考える。

(5) 本研究のような絶縁体表面を粗面化する手法による絶縁性能の向上は，絶縁体の形状の制約がなく，低コストで適用範囲が広い。

平成 28 年　2 月　1 日

学位論文審査報告書（甲）

1．学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

真空中における固体絶縁体の帯電計測

2．論文提出者　(1) 所　　属　数物科学　　専攻

(2) 氏（ふり）　名（がな）　森田（もりた）　裕（ひろし）

3．審査結果の要旨（600～650 字）

固体絶縁体表面の真空中での沿面放電及び帯電現象は非常に複雑で，現在まで解明されていない。一方，微小な凹凸を絶縁体表面につける事で絶縁耐圧が高まるという実験事実は多方面で応用されている。本論文では，真空中の固体絶縁体表面の高精度電位計測装置を開発し，絶縁体表面に高電圧を印加し電位分布の測定を行った。高電圧の印加により負電極から電界放出によりに電子が放出され，絶縁体表面に衝突する。実験では，沿面放電に至らない状況での電位分布の観測から，滑らかな表面では電極付近に正の帯電部を生じ電界が強まる部位が観測された。一方，凹凸のある表面は負に帯電し電界は比較的均一であった。更に，沿面放電後の帯電分布と絶縁耐圧の実験結果等と照合して，表面凹凸の程度による電位分布の変化が沿面放電の発生に寄与し，絶縁耐圧を高める要因である事を実験的に初めて明らかにした。この事から陰極から放出された電子が一個以上の二次電子放出に必要な加速を受けて表面に衝突した時は正の帯電部を形成し，十分な加速を得ずに衝突すると負の帯電部を形成すると考えると，凹凸表面では散乱により十分な加速を得られぬ場合の電位分布になり絶縁耐圧が高まると推測できる。これらの結果は様々な高電圧機器の絶縁信頼性に大きく寄与するものである。以上の内容から森田裕氏の論文が博士（理学）の論文に値するものと結論した。

4．審査結果　(1) 判　　定（いずれかに○印）　(合　格)・　不合格

(2) 授与学位　　博　士（理　学）