



Title	帯電制御による真空中絶縁スペーサの耐圧向上
Author(s)	山本, 修; 小村, 広司
Citation	電気材料技術雑誌. 2005, 14(1), p. 37-47
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/76784
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

帯電制御による真空中絶縁スペーサの耐圧向上

山本 修

京都大学工学研究科
〒615-8510 京都市西京区京都大学桂

小村 広司

関西電力(株) 電力技術研究所 電力基盤技術研究室(流通)
〒661-0974 尼崎市若王寺3-11-20

Improving Surface Insulation Ability by Controlling Charging in Vacuum

Osamu Yamamoto

Graduate School of Engineering, Kyoto University.
Kyotodaigaku Katsura, Kyoto615-8510Japan

Hiroshi Omura

Electric power substrate R&D Division (Delivery), Power Engineering R&D Center,
The Kansai Electric Power Co., ins.
3-11-20Nakoji, Amagasaki, Hyogo661-0974Japan

This paper describes the method that controls the surface charging of a solid insulating spacer used in vacuum. Vacuum environment is used for various kinds of electrical and electronic apparatus and most of them suffer from the electrical insulation along solid dielectrics. The insulation length of such dielectrics varies from some hundreds of microns up to 1000mm depending on the apparatus. From the view point of electrical insulation in vacuum, the weakest point resides on the surface; the discharge along insulator surface. The surface discharge in vacuum is triggered by charging of the surface, and it is thus important to suppress such charging. The first section of this paper emphasizes the importance of studying surface discharge in vacuum and briefly reviews the theoretical basis of the charging of insulators as well as flashover mechanisms in vacuum. In the second section we introduce the promising mechanism that explains surface charging in vacuum. In the third section several methods for controlling surface charge accumulation developed so far by many researchers are introduced. In the later sections we introduce our recent theoretical and experimental studies that demonstrate effectiveness of surface treatment of an insulator to suppress charging and to improve its insulation strength.

1. はじめに

1. 1. 研究の背景

真空中で高電圧ないし高電界の絶縁を必要とする機器には電力用真空遮断器のほかに、電子・陽電子やイオン・重イオンなどの荷電粒子

の発生器・加速器、パルスパワー機器、電子顕微鏡、マイクロ波管、X線管などがある。また、本年市場への投入が発表された SED (Surface-Conduction Electron-Emitter Device) や FED (Field Electron emitter Device) などの次世代薄型ディ

スプレイ (FPD : Flat Panel Display) の開発でも高電圧絶縁が必要である。さらには人工衛星搭載の太陽電池アレイにおけるカバーガラスの絶縁も問題になっている。このように、電力工学、電気電子工学、高エネルギー物理学、宇宙工学、産業応用、さらには医療・医学に関わる機器でも真空中の電気絶縁は基盤技術として重要な地位を占めている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

これらの機器で使用される電圧波形はそれぞれの機器の要求に応じて数10nsのパルス電圧から直流および商用周波交流電圧、さらにはマイクロ波領域の高周波電圧とほとんど全ての範囲にわたっている。絶縁間隔についてみると小さいもので100 μ m、大きいものでは1000mm以上にもなる。高電圧ないし高電界を構造的に支持する固体絶縁物 (支持スペーサ) の材料でもアルミナなどのセラミックを主体として、高分子材料やガラスが用いられ、利用環境やコスト、さらには加工・成型の容易さに応じて異なる。また、その形状は遮断器やマイクロ波管・X線管および真空機器用高電圧導入部 (ブッシング) などのように真空容器をかねる場合は円筒状であり、マイクロ波管の高周波窓や薄型ディスプレイでは板状である。

これらの真空機器では金属導体間に形成される真空ギャップとともに、それと並列の固体絶縁物の内部およびその沿面が絶縁の対象となる。一般には沿面の絶縁耐力が著しく低く、また絶縁距離に対する放電電圧 (フラッシュオーバー電圧) の飽和特性も著しいので絶縁設計には特段の注意が払われている。

最近特に注目されている機器について具体例をあげると、高エネルギーの電子ビーム用ダイオードを備えるパルスパワー機器では数10ns幅でMV級のパルス電圧を、円筒形の高分子製スペーサを用い、総沿面距離500mm程度で絶縁している⁽⁴⁾。薄型ディスプレイでは電子放出源アレイと表示用蛍光板間の数百ミクロンないし数mmの空間に数kVから10kVの直流電圧が加わるが、これをアスペクト比の高い絶縁板で支える必要がある⁽³⁾。

核融合装置では重水素などの負イオンを作り、加速の後に中性化して加熱用燃料として融合炉に供給するが、次世代核融合装置 (ITER) の試作加速部では1MVの直流電圧を総沿面距離1000mm、直径2000mmの複合高分子管で絶縁している⁽³⁾。シンクロトロン加速器の加速電源となる高出力マイクロ波管と加速空洞との間を隔てる高純度のアルミナ製高周波窓では沿面に沿って数 μ s幅の高周波電界 (2.8GHz, 50MW, 8MV/m) が形成されるので、この放電を抑制する必要がある⁽⁵⁾。

衛星用太陽電池を保護する厚さ100 μ m程のカバーガラス (特殊硼珪酸ガラス) は宇宙嵐の高エネルギー電子線に曝されて帯電し、金属製の背面支持部との間で数kV/mm以上の電界が形成され、厚さ方向の沿面放電の危険に曝されている⁽³⁾⁽⁶⁾。電力機器では低環境負荷遮断器として140kV級以上の一点切り高電圧遮断器の開発が進められ⁽⁷⁾⁽⁸⁾、Pyrex[®]ガラスやアルミナセラミック製の真空バルブの商用周波電圧、雷インパルス電圧に対する絶縁設計を含む諸点が問題となっている。

1. 2. 沿面放電研究の経緯

以上のように、真空環境を利用する多くの機器においてそれぞれの利用条件に応じた固体絶縁物の沿面放電が問題となり、その解決のために放電機構の研究が進められている。沿面放電機構の本格的な研究の始まりは1950年代初頭に遡り⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、1960年代初頭には陰極と絶縁物との不完全接合部に形成される3重点からの電界電子放出が放電のきっかけになることが明らかにされた⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。また、絶縁物の帯電現象が放電電圧を低下させる主因であることが明らかになり、絶縁物の二次電子放出特性を勘案した帯電機構も提唱された⁽¹³⁾。すなわち、3重点からの電界放出電子が絶縁物を衝撃し、2次電子なだれSEEA (Secondary Electron Emission Avalanche) 機構によって絶縁物表面を帯電せしめる。このような帯電は実験やシミュレーションで確認されている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。

帯電を抑制する種々の方策も研究され、この流れが現在にも引き継がれている。この間、帯電から放電への進展についても種々の機構が提唱された⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。現在広く支持されているのは二次電子なだれの過程で、絶縁物表面に吸着されているガスの吸着エネルギーを電子の入射エネルギーが超え、解放されたガス分子が局所的に真空を破り、そのガス中で低気圧放電が発生するというものである。

一方、1980年代に入ると上記の放電機構とは異なる放電機構が提唱された。これは Trap-detrap 機構と称されるもので、絶縁物の表面を加工するとき生じる格子欠陥に補足された電子、あるいは局所的に生じた誘電率の変化部などに束縛された電子やイオン（ポーラロン）が何らかの原因をきっかけに一気に解放され、それと同時に電荷の周囲に蓄積されたエネルギーが絶縁物の破壊を伴って解放されるとしている⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。この場合の帯電には電子ビームの外部照射などが考えられるほか、電極間では陰極からの導電機構による電子の注入⁽²⁰⁾⁽²¹⁾なども想定され、固体のバンド理論を基礎におく研究が続けられている。この立場から SEEA 機構は“古典理論”と称されることもある。実験的には表面に電子を束縛する格子欠陥が存在することがカソードルミネッセンスの分光分析や XPS による表面分析などで示されているが⁽²¹⁾⁽²²⁾、沿面放電に結びつくという直接的な証拠は提示されていないのが現状である。

上述のように1980年代以降は真空中の沿面放電の機構に関して SEEA 機構と Trap-detrap 機構を柱とする二つの説が有力説として存在し、それぞれの立場に立った研究が進められている。また、これら二つの説に関して、SEEA 機構はパルス電圧印加時の放電機構、Trap-detrap 機構は直流電圧印加時の放電機構という“住み分け説”も提唱され⁽¹⁷⁾、一定の評価を受けている。しかし、これにも確たる根拠はなく、例えば筆者らが行ってきたパルス⁽²³⁾、直流⁽²⁴⁾、および交流電圧⁽²⁵⁾印加による帯電現象の観察結果は SEEA 機構によって説明ができるものである。

1. 3. 本論文の目的

上述のように、真空中の沿面耐圧を上げるためには固体絶縁物表面の帯電を制御することが肝要である。大気中や液体中の支持碍子などで採用される襞（リブ）のように、沿面距離増大の手法を真空中で適用しても大きな効果は期待できない。本論文では SEEA 機構にもとづく帯電の機構を手短に説明した後、これまでに多くの研究者によって試みられた帯電の抑制法を概観する。また、筆者らが行っている帯電抑制効果に関する理論的、実験的研究の結果を説明する。

2. SEEA 機構による帯電の理論

2. 1. SEEA 機構⁽¹⁾⁽¹³⁾⁽²⁶⁾

真空中では陰極上の3重点から放出される電子が支持スペーサに入射し、表層から2次電子を放出することによって帯電する。入射電子数よりも二次電子数が多ければ表面は正に帯電、少なければ負に帯電することになる。絶縁体に入射する電子の数と放出される2次電子の数の比は2次電子放出係数 δ で与えられ、図1のように入射電子の衝突エネルギーの関数である。その最大値 δ_{\max} とこれを与える入射エネルギー A_i の最大値 $A_{\delta \max}$ は表1のように絶縁体の材料によって異なる。

ここで、2次電子放出係数(が図1のように入射エネルギー A_1 および A_2 において1となるとき、 $A_1 < A_i < A_2$ の範囲では $\delta > 1$ となるため、表面が正に帯電し、このエネルギー範囲の外では負に帯電する。

スペーサ表面が一度正に帯電すると、その後の電子入射時に放出される二次電子は表面に引き寄せられ、つぎの衝突までの軌道は短くなる。したがって電界から得るエネルギーも減少する。このような理由で、帯電が進むにしたがってそれまで $A_i > A_1$ であった入射エネルギーは次第に A_1 に近づき、このエネルギーに落ち着く。

2. 2. 電荷分布の理論計算

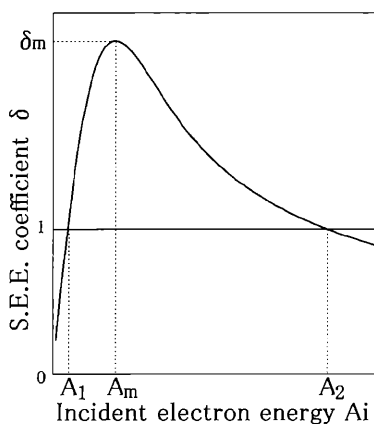


図1 二次電子放出曲線

fig 1. Secondary electron emission curve of an insulator.

表面全体にわたって前項で述べたエネルギー条件($A_i = A_1$)が成り立つと、表面のどの位置でも入射エネルギーが A_1 、したがって二次電子放出係数は1である。このような状態を帯電の平衡状態と呼ぶ。平衡状態では、放出電子の軌道の簡単なモデルを考えることにより次の関係が成り立つことが知られている⁽¹³⁾⁽²⁶⁾。

$$E_t/E_n = \{0.5(A_1/A_s - 1)\}^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 E_t 、 E_n はそれぞれスペーサ表面の電界の接線方向成分および法線方向成分であり、それぞれ帯電電荷の影響を含む電界である。 A_s は二次電子が真空中に放出されるとき初期エネルギーである。一般に二次電子の初期エネルギーは釣鐘形の分布を示すが、数 eV にピークを有するので、 A_s の代表値としてこのピーク値前後の値を採用することになる。

平衡状態の電荷分布を求めるには表面電荷法などを用い、通常電界計算で使用する電位条件 およびスペーサ表面の電束連続条件に、新たに(1)式を境界条件に加えて数値計算する⁽²⁷⁾。

真空中に限らず、ガス中や液中でも指示スペーサの帯電現象が問題になるが、上述のように理論計算が可能であるのは真空中のみであり、特徴的である。真空中ではさらに、電界放出された電子や二次電子の軌道を個々にシミュレーションし、二次電子放出係数を考慮して帯電分布を計算することも可能で、その結果は上述の平

表1 二次電子特性の例⁽³⁾

Table 2. Characteristic values of secondary electron emission rates for insulation materials.

	δ_{max}	$A_{\delta_{max}}$ (eV)	ϵ_r
SiO ₂	2.9 *1	400	3.6
PMMA	2.3 *2	240	3 - 4
PTFE	2.1 *3	400	2
Al ₂ O ₃	5-7 *4	0.8-2 k	9

*1; Seiler, *2; Burke, 3; Burke, 4; Kawai et al.

衡値分布とも良く一致することが確かめられている(28)。

2. 3. 二次電子放出特性

支持スペーサに用いられる固体絶縁物には、前述のようにセラミック材料（主としてアルミナ）、高分子材料（アクリル PMMA、テフロン PTFE、ガラスエポキシなど）、ガラス材料（熔融石英ガラス、硼珪酸ガラス Pyrex[®]など）がある。これらのうちの代表的な材料について二次電子放出特性と誘電率を表1に示す。

通常、二次電子放出特性の測定では二次電子放出係数の最大値 δ_{max} とそのときの入射エネルギー A_{max} に重点が置かれ、帯電のしやすさの指標にされる。しかし、2節の帯電の条件式(1)では、帯電のしやすさが放出係数 $\delta = 1$ に対応する入射エネルギー A_1 に依存するので、 δ_{max} だけに注目すると誤った評価を導く可能性がある。例えば、 δ_{max} が大ききとも、 A_{max} も大きければ A_1 が大きくなるため、結果として帯電電荷の密度が小さくなる。

3. 帯電抑制法

3. 1. 二次電子放出特性の制御

金属の二次電子放出係数が1より小さいのに対して絶縁物のそれは表1のように、小さい材料でも $\delta_{max} = 2$ 以上の値を持つ。一方で、三酸化クロム Cr₂O₃ は絶縁物であり、しかも $\delta_{max} \leq 1$ とされている。この Cr₂O₃ を例えばアルミナに含浸させるか、混合したのちに焼成するなどして、二次電子放出係数を下げる試みがある。

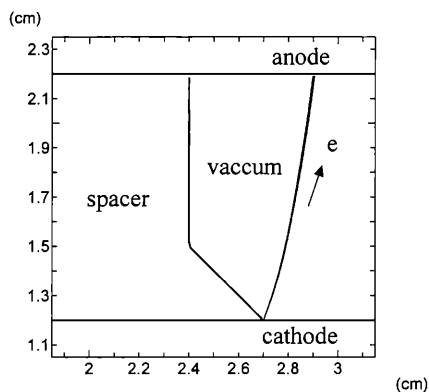


図2 円錐台を付加した支持スペーサ
fig 2. An insulating spacer model with a frustum at cathode end..

例えば Sudarshan 等⁽²⁹⁾は含浸法によりインパルス耐圧が上昇したと報告している。PVD などの方法で任意の材料にコーティングすることができれば帯電を抑制できるが⁽³⁰⁾、安定で有効な膜を作成するのは容易でない。

高周波窓のように無電極の場合には、幾分導電率は高いが二次電子放出係数が小さい材料、例えば窒化チタン TiN を島状分布に蒸着して効果を得ている⁽³¹⁾。

3. 2. シールドリング

電極間の支持スペーサの帯電に寄与する初期電子は、一般には陰極の3重点またはその近傍から電界放出される電子と考えてよい。3重点での局部電界はほぼ周囲の平均電界に絶縁物の誘電率を乗じた値になる。したがって、電界放出の抑制に3重点の電界を緩和することも重要である。この目的のために高電圧機器では電界緩和用のシールドリングがしばしば付設される。絶縁支持物を陰極に埋め込むか、あるいは陰極の一部を絶縁物内部に突き出すなどの試みも行われている⁽³²⁾。

これらのシールドリングは静電界の計算と実験をもとにして設計されるが、帯電現象も考慮した効果的なシールドリングの設計法の開発が望まれる。

3. 3. スペーサの形状効果

陰極3重点の電界を緩和するのに支持スペーサの形状を工夫する方法がある。スペーサが円

柱形や円筒型であって、その表面が陰極と直角に交わる場合3重点の周囲の平均電界は印加電圧をスペーサの長さで除した値を持つ。しかし、例えば円錐台型のように陰極面とスペーサ表面とのなす角が鈍角になると、高木効果⁽³³⁾と呼ばれる現象で、理論的には3重点の電界が零になる。

さらに、鈍角を有する円錐台型では空間の電界が電子をスペーサの表面から遠ざける方向に変化する。通常、電界放出される電子の初期エネルギーは数 eV 程度かそれ以下であるので、円錐台型スペーサが真空部に形成する電界に打ち勝ってこの電子が表面に入射することは、計算によって確かめてもほとんどおこらない⁽³⁴⁾。

以上のように、支持スペーサ形状の工夫は帯電の防止に大いに効果があり、耐電圧の向上に寄与する⁽¹³⁾⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾。鈍角の大きさとして135度程度が良く採用され、この場合の耐電圧は円柱(90度)に比べて2倍以上高くなる。

支持スペーサを円錐台のような形状にすると、容易に類推できるように、スペーサが占める体積が大きくなり、機器のコンパクトさを損ねる場合がある。そこで、容積の増大を抑えるために、スペーサ全体を円錐台にするのではなく、円柱型スペーサの陰極側の一部のみを円錐台とした例を図2⁽³⁷⁾に示す。同図にはシミュレーションによる電子の軌道も示してあり、一部分を円錐台とするだけでも効果を得られることがわかる。有効な円錐台の高さは、全高さ10mmのスペーサの場合、3~5mm程度である。このとき耐電圧は1.5倍程度上昇する⁽³⁷⁾。

3. 4. 表面粗さの効果

極めてシンプルで有効な帯電の抑制方法に、支持スペーサの表面を荒らす方法がある⁽²³⁾⁽²⁵⁾⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾。図3に示すように、表面の凹凸が2次電子なだれの電子に対してバリアとなるからである。すなわち、表面が滑らかな場合には同図(a)のように、二次電子の軌道のスペーサ表面からの高さ(Hopping height)は平均して1 μm以下⁽³⁹⁾であるので、表面にこれより高い凹凸

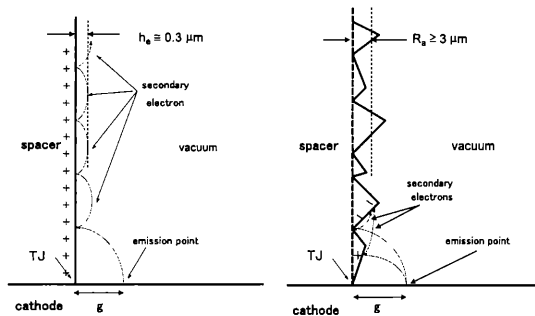


図3 表面粗さ効果の模式図
 fig 3. Trajectories of electrons.

(a) Ideally smooth surface, and (b) roughened surface.

があると電子は乗り越えられない。平均の粗さを $3\ \mu\text{m}$ 程度にすると実質的な帯電抑制効果が得られ、耐電圧は2倍程度高くなる⁽³⁹⁾。

この方法を採用すると、円錐台型スペーサのようにスペーサの形状が原因で機器のコンパクトさが損なわれることはない。表面を荒らすには高分子などの比較的硬度が低い材料では紙やすりを用いて丹念に加工するか、旋盤を用いて螺旋状に溝を掘るように加工する。セラミックスやガラスなどの比較的硬度の高い材料ではダイヤモンド砥粒等を用いて研磨加工をする⁽³⁹⁾。

4. 帯電の測定法

帯電現象の測定には静電的なプローブを用いるのが一般的である。帯電した絶縁物の表面にプローブを近づけ、二次元で走査して電荷密度分布を得る⁽³²⁾⁽⁴²⁾⁽⁴³⁾。この場合の測定は、一般に印加電圧を下げた後で行われる。最近では電圧を印加したまま実時間で測定する手法が目立っている。プローブが放電空間の電界分布に影響を与えないように、陰極表面の一部を絶縁してセンサーとする手法を取る⁽²⁴⁾⁽⁴⁴⁾。この場合にはプローブへ直接に電子やイオンが流入しないように、試料絶縁物でプローブ表面を覆うなどの工夫が必要である。このほかの実時間測定法として、電気光学効果（ポッケルス効果）を用いた二次元の帯電観測法が極最近になって開発されている⁽⁴⁵⁾。

静電的方法の例として、筆者らが用いている実時間観測のためのプローブ配置を図4に示す。試料の外周形状に合わせてリング状のプロ

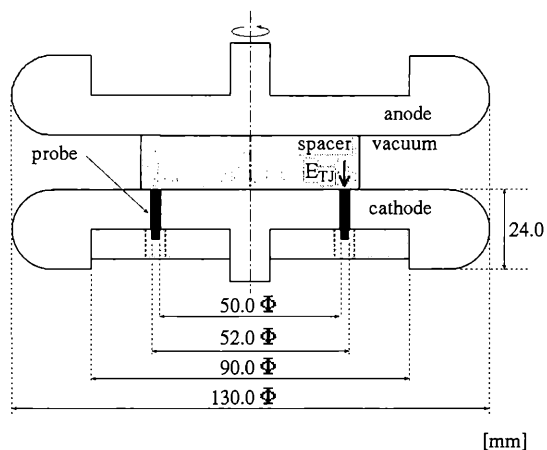


図4 試料スペーサとプローブの配置
 fig 4. Arrangement of insulator specimen and probe

ーブである。直径の小さい試料の帯電現象は円周方向にほぼ均一（回転対象）に生じることが多いので、リング形状で対応している。リングを複数個に分割すれば、不均一な分布にも対応できる⁽⁴⁰⁾。いずれの場合もプローブはそれぞれコンデンサを通して接地され、その端子電圧から帯電の状況が観察できる。この検出回路の時定数を十分に大きくとれば、パルス電圧⁽²³⁾、直流電圧⁽²⁴⁾および交流電圧⁽²⁵⁾のいずれにも対応できる。

5. 粗さ効果に関する実験

図4のプローブによる測定例を図5⁽³⁸⁾に示す。同図はランプ波直流電圧を円柱型試料に印加したときの例で、3重点（Triple Junction）近傍の陰極表面電界を測定しているためプローブ信号を E_{TJ} と表している。したがって、 E_{TJ} は印加電界成分 E_g と帯電電荷による電界成分 E_s との和になっている。

電圧が上昇すると、ある電圧で帯電が始まり E_g に E_s が重畳する。 E_s は印加電界にほぼ比例して増加することが見てとれるが、これは2節で述べた帯電の理論と整合している。また、この理論に基づいて計算した帯電分布について陰極電界を計算すると、測定した E_s と一致することが確かめられる⁽²³⁾⁽³⁸⁾。なお、このような帯電は微少なパルス電流を伴う。

電圧印加を止めると（図5では20kV） E_g は零になるが E_s は残り、試料が帯電したままになっ

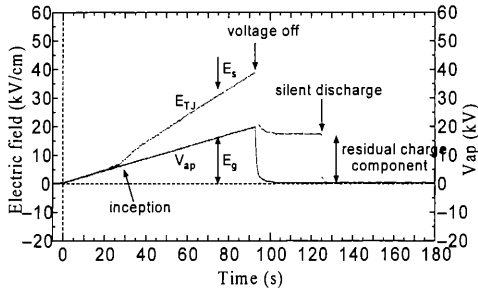


図5 ランプ波直流電圧印加時の帯電測定例⁽³⁸⁾
 fig 5. An example of charge measurement when a cylindrical insulator is subjected to a ramped voltage.
 (PMMA with smooth surface. 54mm ϕ , 10mm length.)

ていることがわかる。この後で真空タンクに少量の空気などを導入すると、残留電荷が作る電界によって低気圧放電（図中 Silent discharge と記載）が発生し、容易に除電される。この現象から試料の表層のみが帯電していると推定できる。

試料の表面粗さを変えて同様の測定をおこなった結果を図6⁽³⁹⁾に示す。図の縦軸は E_{TJ} を E_g で規格化し、帯電の強さを表している。この例のように帯電強度は表面粗さとともに小さくなり、おおよそ $3\mu\text{m}$ 以上で $E_{TJ}/E_g=1$ 、すなわち帯電が生じないことがわかる。交流電圧を印加する場合にも図6と同様に表面粗さの効果が得られることが確かめられている⁽²⁵⁾⁽⁴⁶⁾。平均の表面粗さが約 $3\mu\text{m}$ のとき、交流電圧印加に対しても耐電圧は2倍程度上昇する⁽²⁵⁾⁽⁴⁶⁾。

6. 形状効果に関する実験

ここでは交流電圧に対する形状効果を検討する。交流電圧を印加する場合には、位相によって高低両電極いずれかが陰極になるので、円柱の両端を円錐台型にすることが望ましい。例として、図7のように高さ $h=10\text{mm}$ のスペーサの両端部を円錐台型とし、その高さ h_1 を変えることを考える。円柱部の長さを h_2 とすると $h=2h_1+h_2$ である。陰極面と試料スペーサの表面が成す角は135度で一定である。

まず $h_1=0$ 、すなわち円柱型試料に交流電圧を印加した場合の帯電の様子を図8⁽⁴⁶⁾に示す。図では、プローブ信号 E_{TJ} から印加電界 E_g を差し引いて帯電電荷成分 E_s をもとめている。この

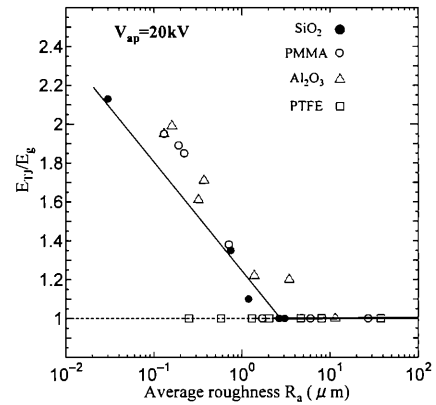


図6 帯電強度と表面粗さの関係⁽⁴²⁾
 fig 6. Relation of normalized charge magnitude with surface roughness

E_s にみられるように、帯電電荷成分は交流の位相、したがって電圧の極性に関わらず正極性である。また、 E_s は直流分に矩形波成分が重畳した形になる。矩形波成分の上昇部は正位相、下降部は負位相で生じ、それぞれ電流パルスを伴う。

このように帯電電荷の極性が常に正である理由、ならびに矩形波成分が重畳する理由は、2節で述べた方法による帯電分布の解析から検討できる。すなわち、図9⁽⁴⁶⁾に示すように、正負位相の電圧ピーク値に対して計算した表面電荷の極性は位相に関わらず正であり、かつその密度は陰極側で高く陽極側で低い分布となる。プローブは接地電極にあるため正位相では密度の高い側に近く、負位相では密度の低い側に近くなる。この距離の変化に伴ってプローブ信号は矩形波成分を形成する⁽²⁵⁾⁽⁴⁶⁾。

両端部が円錐台型に加工されたスペーサの測定例が図10である。同図では E_{TJ} と E_g が完全に重なっている。すなわち帯電していない。このことは電流波形にパルス電流成分が無く、充電電流のみであることから確認できる。耐電圧



図7 両端部を円錐台型に加工したスペーサ
 fig 7. A spacer with two frustums at both ends

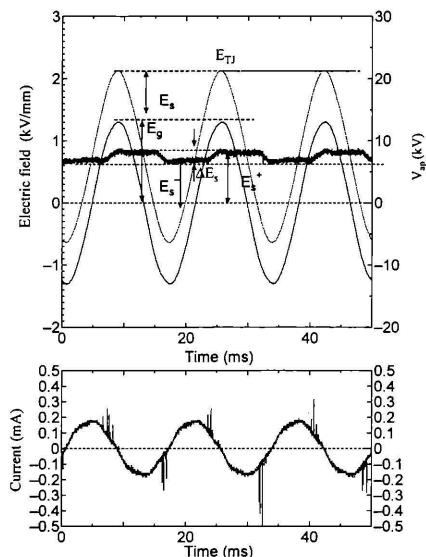


図8 円柱型スペーサの交流帯電現象⁽⁴⁶⁾
 fig 8. Charging phenomena of a cylindrical insulator
 under AC excitation.
 (PMMA with smooth surface, 54 φ, h=10, h₁=0.)

は h₁=3 mm のとき約 2 倍に上昇する。

7. おわりに

真空中の沿面放電について、その研究の現代的な重要性について述べるとともに、支持絶縁物の表面帯電現象に注目して研究の歴史を概観した。また、これまでに研究されてきた帯電抑制のためのいくつかの有効な方法について紹介するとともに、筆者等がこの数年にわたって研究、ないしは提案している帯電抑制法のうち、新しい結果を含めた 2 種の方法を紹介した。このうち、表面を数ミクロンの粗さにする帯電抑制法は極めてシンプルな方法であるとともに、

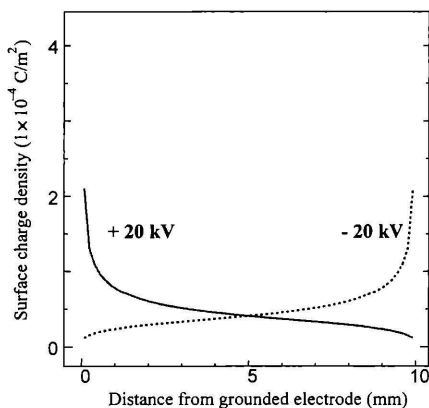


図9 交流電圧印加時の電荷分布⁽⁴⁶⁾
 (陰極側で密度が高くなっている)
 fig 9. Surface charge distributions for positive and negative voltage peaks under AC excitation

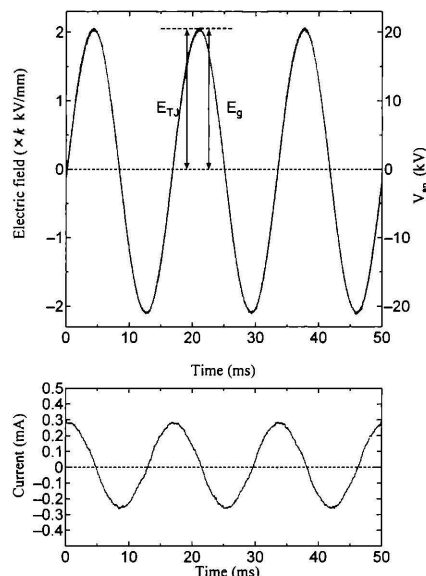


図10 両端部を円錐台型に加工したスペーサの
 交流帯電現象の抑制
 fig 10. Probe signal showing that the charging is suppressed
 by adding frustums at both ends.
 (AC voltage application. PMMA, h=10, h₁=3.)

耐電圧向上への効果も絶縁体の形状を変えるのと同様か、それ以上に大きいことがわかってきた。また、最近になって沿面距離にして数100 μmから50mmの広範囲にわたって有効であることもわかってきている⁽⁴⁷⁾。今後、これらの研究成果を実用化し、よりコンパクトで信頼性の高い機器の開発に寄与したいと考えている。

参考文献

- (1) 「真空中での放電の利用とその制御」、電気学会技術報告第586号(1996)
- (2) 「真空中での荷電粒子の発生と放電の制御」、電気学会技術報告第757号(1999)
- (3) 「高エネルギー密度化に係わる真空中の放電制御技術」、電気学会技術報告第1001号(2005)
- (4) W. A. Stygar, H. C. Ives, O. Yamamoto et al., "Flashover of a vacuum-insulator interface ; A statistical model", Physical Review Special Topics-Accelerators, vol.7, 070401, pp.1-21 (2004)
- (5) S. Michizono, Y. Saito, "Surface Charging by UV Irradiation at The Alumina RF Window",

- Proc. of XXth Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum(ISDEIV), pp. 331-334(2002)
- (6) 松本敏明、志方吉夫、豊田和弘、趙 孟佑 ; 「静止軌道プラズマ環境における太陽電池アレイ表面での放電プラズマの帯電電荷取り込み量の測定」、IEEJ Trans. FM, Vol. 123, No.12, pp.1217-1226(2003)
- (7) M. Homma, M. Sakai, E. Kaneko, S. Yanabu; "History of Vacuum Circuit Breaker and Recent Development in Japan", Proc. of XXIth Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.378-383(2004)
- (8) M. Yumoto : "Physics of Electrical Discharges is a Profound and an Extensive World", IEEJ, Fundamentals and Materials, Special Issue Review (5), pp.11-12(2005)
- (9) P.H Gleishauf; " Electrical Breakdown over Insulators in Vacuum", J. Appl. Phys, Vo.22, No.5, pp.535-545(1951)
- (10) P. H Gleishauf; "Electrical Breakdown over Insulators in Vacuum", J. Appl. Phys, Vo.22, No. 5 , p766-771(1951)
- (11) M. J. Kofoid; "Phenomena at the Metal - Dielectric Junctions of High-voltage Insulators in High Vacuum and Magnetic Field", Trans. AIEE, Part III, 79, p991(1960)
- (12) M. J. Kofoid; "Effect of Metal-Dielectric Junctions on High-Voltage Breakdown over Insulators I Vacuum", in High Vacuum", Trans. AIEE, Part III, 79, p999(1960)
- (13) H. Boersch, H. Harmish, and W. Ehrlich : "Surface discharge across insulators in vacuum", Z. Angew Phys., Vol. 15, pp.518-525(1963)
- (14) 山本 修、田辺義孝、宅間 董、I. D. Chalmers ; 「真空中絶縁スペーサの帯電分布と帯電メカニズムの検討」、電気学会論文誌 A, 第119巻 第2号 pp.171-176(1999)
- (15) 山本 修、宅間 董、梯 靖弘、生駒慎吾、西本暁洋: 「真空中円錐台形スペーサの帯特性—角度依存性に関する理論と実験結果の比較—」、電気学会論文 A, 第120巻 第12号 pp.1070-1075(2000)
- (16) R. A. Anderson; "Surface Flashover : Three Decades of Controversy", Proc. of XIVth Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, p311(1990)
- (17) H. C. Miller : "Flashover of Insulators in Vacuum", IEEE Trans. Electr. Insul. Vol. EI-28, No. 4 , p512(1993)
- (18) G. Blaise, C. Le Gressus; "Charging and Flashover Induced by Surface Polarization Relaxation Process", J. Appl. Phys., Vol. 69, No.9. p6334(1991)
- (19) R. V. Latham; "High Voltage Vacuum Insulation, academic Press, London(1995)
- (20) N. C. Jaitly, T. S. Sudarshan; "DC Surface Flashover Mechanism Along Solids in Vacuum Based on a Collision-Ionization Model", J. Appl. Phys., p64, 3411(1988)
- (21) Guan-Jun Zhang, Xue Wan, Zhang Yan; "The Correlation between Surface Chemical Elements of solid Insulating Materials and Their Flashover Characteristics in Vacuum", Proceedings of XXth ISDEIV, pp.626-629(2002)
- (22) C. R. Li, L. J. Ding, J. Z. Lu; "The Relation of Trap Distribution of alumina with Surface Flashover Performance in Vacuum", Proc. of XXIth Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.99-102(2004)
- (23) O. Yamamoto, T. Takuma, Y. Kakehashi, S. Ikoma : "Delay Characteristics of Surface Charging on a Cylindrical Insulator in Vacuum", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.7, No.6, pp.812-817(2000)
- (24) O. Yamamoto, T. Takuma and Y. Tanabe : "Real-time observation of surface charging on a cylindrical insulator in vacuum", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.5, No.6, pp.961-965(1998)
- (25) O. Yamamoto, T. Fukuda, H. Sano, H. Omura; "Charging Process of a Solid Insulator in

- Vacuum under A.C. Voltage Excitation", Proc. of XXIth Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.606-609 (2004)
- (26) C. H. De Tourreil, K. D. Srivastava; "Mechanism of Surface Charging of High-Voltage Insulators in Vacuum", IEEE Trans. Vol. EI-8, No.1, pp.17-21(1973)
- (27) 山本 修、原 武久、大前公人、中江俊博、林 宗明;「真空中の複合絶縁におけるスペーサ効率とフラッシュオーバー機構」、電気学会論文誌、110-A 巻 12号 pp.830-838(1990)
- (28) Yamamoto, T. Hara, I. Nakanishi, M. Hayashi : "Monte Carlo Simulation of Surface Charge on Angled Insulators in Vacuum", IEEE Trans. Electr. Insul. Vol. EI-28, pp.706-712(1993).
- (29) T. S. Sudarshan, J. D. Cross; "The Effect of Chromium Oxide Coatings on Surface Flashover of Alumina Spacers in Vacuum", IEEE Trans. Electr. Insul., EI-11, No.1, pp.32(1976)
- (30) 山本 修、原 武久、嶋田、鈴木泰夫;「モンテカルロシミュレーションによる真空中スペーサの帯電特性の研究—セラミックスコーティングの効果—」、電気学会論文誌 114-A 巻 2号 pp.108-116(1993)
- (31) S. Michizono, Y. Saito; "Surface Charging by UV Irradiation at The Alumina RF Window", Proc. of XXth Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.331-334 (2002)
- (32) I. D. Chalmers, J. H. Lei, B. Yang, W. H. Siew; "Surface Charging and Flashover on Insulators in Vacuum", IEEE Trans. DEI, Vol, 2, No.2, p225(1995)
- (33) 河野照哉、宅間 董、「数値電界計算法」コロナ社、pp.116-120(1980)
- (34) 山本 修、宅間 董;「真空沿面フラッシュオーバー特性と陰極接合部電界」、Trans. IEEJ, Vol. 119-A, No.2, pp.159-164(1999)
- (35) A. Watson : " Pulsed Flashover in Vacuum", J. Appl. Phys., 38, No.5, p2019(1967)
- (36) O. Yamamoto, T. Hara, T. Nakae, M. Hayashi, I. Ueno; "Effects of Spark Conditioning, Insulator Angle and Length on Surface Flashover in Vacuum", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.24, No.6, pp.991~994(1989)
- (37) 山本 修、福田正樹、宅間 董、園田敏雄 ; 「真空中絶縁スペーサの陰極側形状と帯電・絶縁特性」、放電学会誌、放電研究45巻 3号 pp.45-50(2002)
- (38) 山本 修、宅間 董、濱田昌司、梯 靖弘、生駒慎吾、西村孝一、塩入 哲;「真空中の固体誘電体帯電現象における表面粗さの影響」、電気学会論文誌 A、第119巻 第10号 1221-1228頁(1999)
- (39) O. Yamamoto, T. Takuma, M. Fukuda, S. Nagata, T. Sonoda; "Improving Withstand Voltage by Roughening the Surface of an Insulating Spacer Used in Vacuum", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, No.4, pp.550-556(2003)
- (40) 山本 修、宅間 董、福田正樹、永田 悟 ; 「固体絶縁物の表面加工による真空沿面放電経路の制御」、電気学会論文誌 A、123巻 4号 pp.370-375(2003)
- (41) 大久保 仁、臼井健太郎、加藤克己、森田 歩;「真空中帯電生成に及ぼす固体絶縁物表面粗さの影響」、平成17年度電気学会全国大会、1-047, p59(2005)
- (42) Y. Yamano, K. Kasuga, S. Kobayashi, Y. Saito; "Surface Flashover and Charging Characteristics on Various Kinds of Alumina Under Non-Uniform Electric Field in Vacuum", Proc. of XXth Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.115-117(2002)
- (43) Y. Yamano, S. Itoh, K. Kato, H. Okubo, Y. Hakamata ; "Charging Characteristic and Electric Field Distribution on Alumina as Affected by Triple Junction in Vacuum", IEEE Trans. on DEI Vol.9, No.2, pp173-177(2002)
- (44) K. Suzuki, K. Kato, Y. Hakamata, H. Ohkubo,

"Real-time and High-speed Measurements of Charging Processes on Dielectric Surface in Vacuum", IEEE Trans. Diel. and Electr. Insul. Vol.10, pp.563-568,(2003)

- (45) Y. Yamano, Y. Miyauchi, S. Kobayashi, Y. Saito; "Measurement of Surface Charge Distributions on Insulating Films under AC Electric Field in Vacuum by Pockels Effect", Proc. of XXth Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.660-603 (2002)
- (46) 山本 修、福田正樹、佐野大輝、園田敏雄；「交流電圧による絶縁スペーサの帯電現象」、電気学会研究会資料、ED-04-20、pp.43-48(2004)
- (47) 佐藤剛洋、林 泰隆、濱田昌司、山本 修、小林哲生；「長間隙真空沿面放電における資料表面粗さの効果」、平成17年度電気学会全国大会、1-042, p54(2005)

山 本 修



昭和23年2月22日生まれ。昭和45年3月立命館大学理工学部数学物理学科卒業。現在京都大学工学研究科電気工学専攻助手。主として放電工学、高電圧工学に関する研究に従事。工学博士。電気学会、放電学会、IEEE 会員。

小 村 広 司



昭和35年9月24日生まれ。昭和54年3月島根県立松江工業高等学校電気科卒業。同年4月関西電力(株)入社。現在に至る。主としてサージ解析および変電機器の研究に従事。電気学会 会員

(2005年3月28日受理)