

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560290

研究課題名（和文） 帯電制御による真空高電圧機器の絶縁設計基礎研究

研究課題名（英文） Basic Study on Insulation Design in Vacuum for High-voltage Apparatus Based on Control of Surface Charging

研究代表者

山本 修 (YAMAMOTO OSAMU)

京都大学 大学院工学研究科・講師

研究者番号：70093333

研究成果の概要：真空中で高電圧ないし高電界を用いる機器の絶縁設計に資するため、円筒型絶縁容器の内表面に生じる帯電現象を①陰極埋め込み型の静電プローブによる電界計測、②可動型静電プローブによる容器外部からの電荷分布の観測、および③計算機シミュレーションによる電荷分布の解析を行った。これらにより、容器内面の帯電現象を明らかにするとともに、特に電界緩和用に設けたシールドリングの帯電抑制効果を解明し、絶縁設計の指針を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電気機器工学

キーワード：帯電、フラッシュオーバー、シールドリング、絶縁円筒、真空

1. 研究開始当初の背景

電力用遮断器や粒子加速器などの機器では、真空容器を兼ねた絶縁支持物として絶縁円筒が用いられる。代表者は従来から真空環境を利用する機器の電気絶縁、特に高電圧部を支持する固体絶縁物の帯電に起因した真空沿面放電に対する絶縁の研究を行っている。一方、これらの機器の絶縁耐力向上策として電界緩和用シールドリングが多用されてきた。しかし、その帯電抑制への効果は不明であり、配置等についての合理的な設計指針が求められていた。

2. 研究の目的

沿面放電を抑制するためには表面状態や形状を工夫して帯電しにくい絶縁支持物を開発するとともに、適切な形状の電界緩和用シールドリングの設計指針を明らかにすることが必要である。絶縁物の形状や表面状態を工夫した帯電しにくい絶縁支持物については既に、これまでの筆者らの研究を含めて、相当程度明らかになっているので、本研究では帯電現象を基本として真空沿面放電を基礎的に研究することにより、特にシールドリングによる帯電・放電の抑制効果を明らかにし、コンパクトで絶縁性能が高い機器の設計指針を与えることが目的である。

3. 研究の方法

図1に示すように、一対の円板電極（ともに直径130 mm、厚さ24 mm）、絶縁円筒（内径50 mm、外径54 mm、長さ55 mm）およびシールドリング（以下、単にリングと呼ぶ）からなる電極系を用いた。リングの高さ h 、厚さ $2r$ （断面の先端曲率 r ）、円筒容器との隙間 c は数種類変えた。この電極系を大気中に置き、円筒内部をターボ分子ポンプにより排気し、真空とした。陽極にランプ波直流電圧を印加して内部表面を帯電させた後、可動型の電位プローブを配置して円筒外部から分布を計測した。

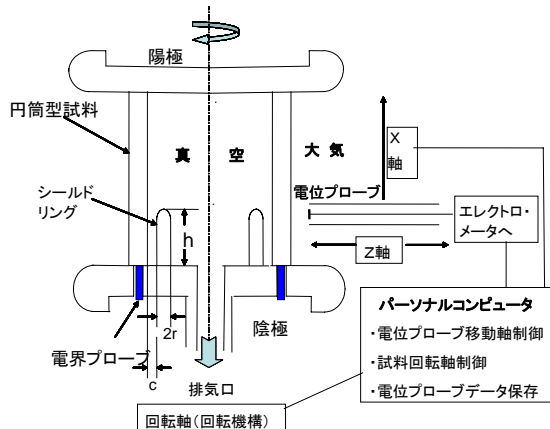


図1 リング付円筒型試料と実験システム

可動プローブは直径2 mmのセンサを有し、制御用PCを用いて同図のx軸、z軸に関して任意の方向に駆動できる。また、同じ制御システムにより絶縁円筒を回転させることができる。この場合、磁気シール接続継手を用いて、中央部に排気口を有する陰極とターボ分子ポンプとが接続されており、真空排気を行いつつ電極系全体を回転させることができる。すなわち、この可動プローブシステムによって外部から絶縁円筒の表面全体をスキャンできる。電圧印加時には可動プローブを十分遠方に置き、その電界に与える影響

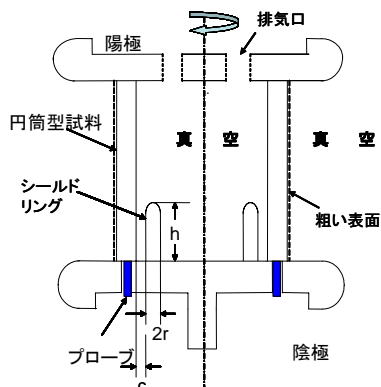


図2 陰極埋め込み型プローブを用いる場合の実験試料

を排除した。その後電圧を降下し、プローブを円筒外面から0.5 mmないし1 mmの位置まで近づけて測定を行った。

帯電の元になる電子放出源は陰極と絶縁物および真空がなす3重点と考えられているので、この3重点の近傍の電界を測定することが重要である。この測定には筆者等が従来から用いている陰極埋め込み型プローブを用い、帯電に伴う陰極電界の変化をリアルタイムで観察した。のプローブを用いる場合は、真空リークを防止する観点から、円筒を含む試料全体を真空容器に入れた。ここでは、図2に示すように、陽極に設けた複数の貫通穴から円筒内部の真空引きをした。なお、円筒外表面が帯電しないように表面粗さを約3 μm とした。また、陽極に直流電圧を印加しリングの有無および配置によるフラッシュオーバー電圧の違いを測定した。

4. 研究成果

(1) 電荷分布のシミュレーション 先ず、それぞれのリング配置条件について代表者等により開発済みの帯電シミュレーションプログラムを用いて、帯電分布およびそれによる陰極電界の分布を予測・解析した。一例として、リングの有無、リング形状に関するパラメータを変えた場合の帯電電荷分布の計算例を図3に示す。図のように、リングが無い場合は陰極から陽極に向けて減衰する正電荷分布となるが、リングを設置した場合は陰極からリング高さに相当する範囲が正ないし負の電荷密度となり、リングの効果による帯電抑制効果が顕著に現れる。これらの結果から、リングを含めた電極系の作成可能性をも勘案して、リングを数種類選定した。

(2) 荷分布の測定結果 図1で説明した可動型プローブを用いて、試料の外部から帯電電荷分布を測定した。まず、基本的な電荷分布を知るため、リングの無い円筒型試料について測定を行った。測定例を図4に示す。同図の横軸は陰極からの距離であり、パラメータ

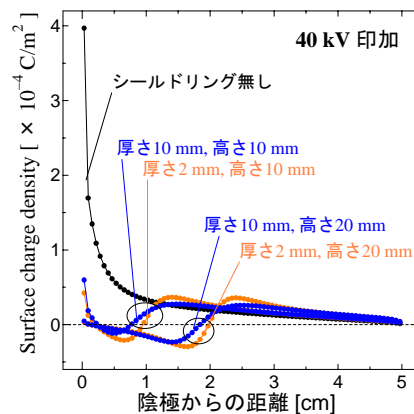
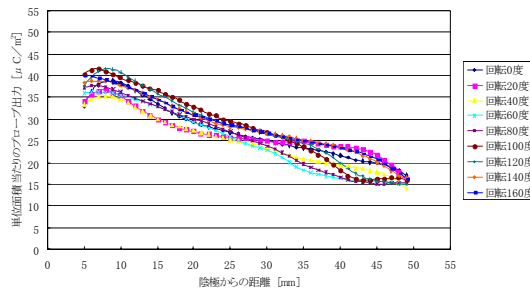
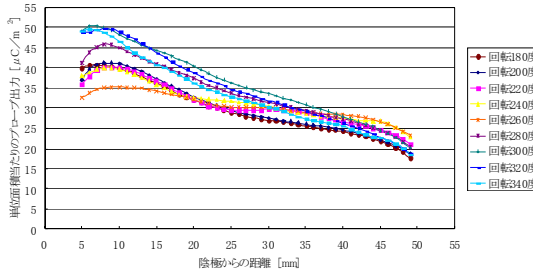


図3 計算から予測される円筒試料内面の帯電分布 ($c = 3 \text{ mm}$ の場合)



(a) 0 から 160 度



(b) 180 から 340 度

図 4 可動プローブによる電荷分布の測定例 (Pyex, 25kV 印加, h=55mm, リング無し)

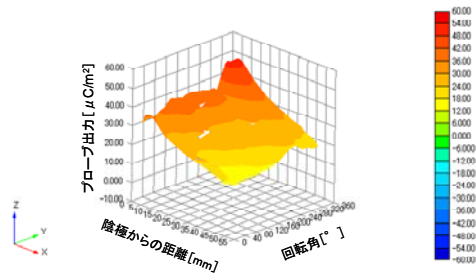


図 5 可動プローブによる電荷分布の測定例 (Pyex, 25kV 印加, h=55mm, リング無し。図 4 の 3 次元表示)

として円筒の円周方向に 20 度ごとの角度をとっている。同図では測定線が込み合うのを避けるため、0 から 160 度と 180 から 340 度の 2 領域に分けて示した。図のように 0 から 160 度区間では測定線がほぼ同じであり、電荷分布の角度依存性は小さい。一方、180 から 340 度区間では、特に陽極側において角度分布は大略回転対象となっている。このように角度による幾分の相違があるものの、全体としては図 3 の計算において導入した回転対象二次元の仮定がほぼ正しいことを実証した。これらの測定結果をさらに 3 次元表示したものが図 5 であり、円筒内面の帯電の様子がより具体的に把握できた。

(3) 電荷分布に関する理論と測定結果の比較

図 3 で示した計算による電荷分布は陰極に近づくにしたがって急増すが、可動型プローブによる測定結果では図 4 のように陰極の近

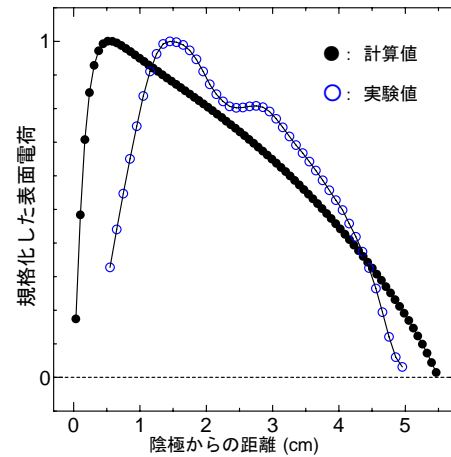


図 6 リングが無い場合の分布形状の比較

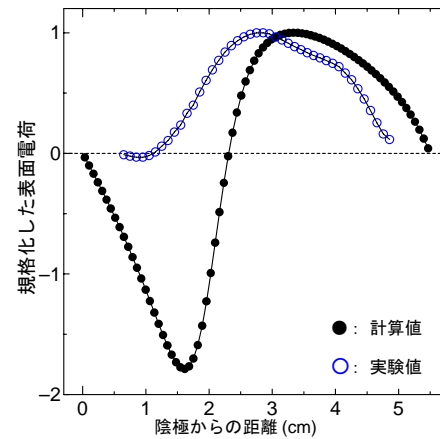


図 7 高さ 20mm のリングがある場合の分布形状の比較

くで極大を持ち、さらに陰極に近づくると減少する。これは、試料内表面に生じた電荷（真電荷）からの電束の多くが陰極に達し、一部が試料を通してプローブセンサに到達するためである。このことを考慮するため、内面の真電荷から試料の外表面に誘起される分極電荷を計算し、その分極電荷と可動プローブによる測定結果を比較したのが図 6 である。この図では計算と測定両分布についてそれぞれの極大値で規格化し、形状の比較を行っている。同図のように、両分布曲線は、完全には一致しないもののほぼ相似形となっており、電荷分布に関する計算-測定の整合性がとれていることが分かった。

図 6 はリングを持たない円筒型試料の場合の比較であるが、リングがある場合についても同様に計算による分布と測定による分布を比較して図 7 に示す。同図はリング高さが 20mm のときの例であり、計算によると試料外面の分極電荷の分布には正電荷の領域と負電荷の領域が生じる。負電荷の領域はリン

グ先端から陰極にかけての範囲である。一方、測定による分布は正電荷の領域のみであり、計算-測定の結果に不一致が見られる。この不一致の原因は不明であるが、帯電にかかわる陰極からの電子放出量が負帯電の進行とともに抑制されるため、現実には負帯電が生じないものと思われる。これについては陰極埋め込み型プローブによる測定を行ってさらに検討した。

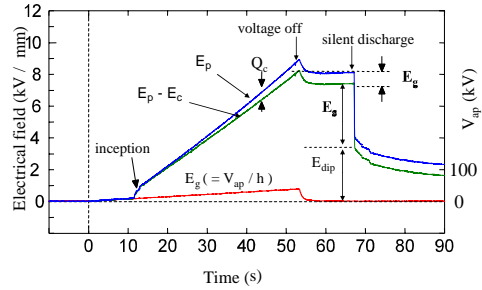
(4) リングによる陰極電界の緩和効果 図2の埋め込み型プローブを用いて陰極電界を測定した例が図8である。この例では円筒試料としてパイレックスガラスを用いているので、印加電界成分 E_g 、帯電電荷による電界成分 E_s 、および双極子分極による電界成分 E_{dip} と導電電流成分 Q_c が含まれている。これらの中から E_g と E_s とを抽出する。同図(a)はリングが無い場合、(b)はリングがある場合の測定例であり、リングの効果で E_g 、 E_s ともに低下していることが見てとれる。

これらの測定結果より E_s 、 E_g 両電界成分の和を求めた。一方、図3のような電荷分布の計算結果を用いて、さらに陰極上の電界分布を計算し、プローブ上での両電界の和を求めて比較したのが図9である。同図から、測定および計算いずれについてもリングの効果により陰極電界が低下することがわかる。

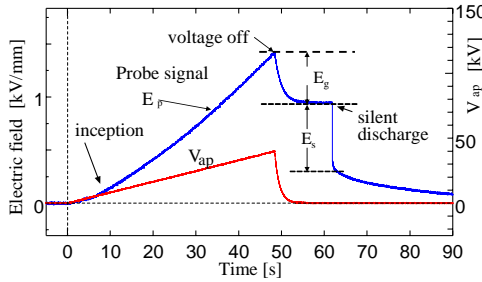
図9から、リングの電界緩和効果は高さ $2r$ の大小にはほとんど依存せず、高さの効果大きい。高さ $h=10\text{mm}$ のときは、リングなしと比較して電界は5分の1程度となり、計算-測定の結果も一致する。リングの高さ $h=20\text{mm}$ に大きくすると、計算-測定ともさらに数分の1に下がることがわかった。

ただし、 $h=20\text{mm}$ の場合、計算によるリングの電界低減効果は測定から得られるそれよりも大きく現れる傾向がある。これは、図7で議論したように、計算では負電荷による電界緩和効果が大きく働いたためと考えられる。実際には可動プローブの測定結果が示すように、リングが有る場合でも負電荷の帯電領域は生成されない。今後は計算方法においてこの事実を考慮した改善が必要であることがわかった。

(5) フラッシュオーバー特性 リングによる放電抑制効果を確認した結果を図10に示す。図のようにリングがない場合の放電電圧は40kV程度であるが、リングにより最大120kV程度まで上昇し、リングの効果が明らかに現れている。ただし、リングの厚さ $2r$ が2mmの場合は10mmのときに比べて放電電圧が低くなる傾向がある。この原因は、リングによる帯電抑制効果・陰極電界緩和効果にもかかわらず、リング先端の極率半径が小さいため、先端電界がより強くなるためであり、放電がリング先端から開始するためと考えられる。これより、リングの形状として、その先端曲



(a) リングなし



(b) リングあり ($h_s=10, r_s=5, c=3$)

図8 埋め込みプローブによる陰極電界の測定例

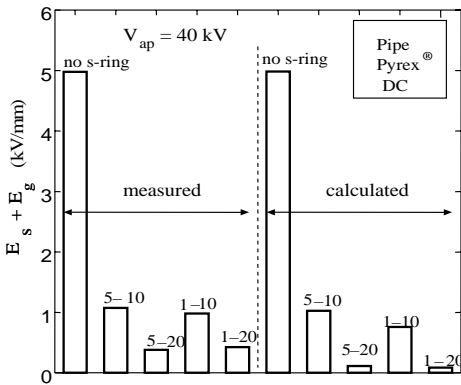


図9 陰極電界

(各棒に付した数値は $r-h$ を表す。 $c=3\text{mm}$)

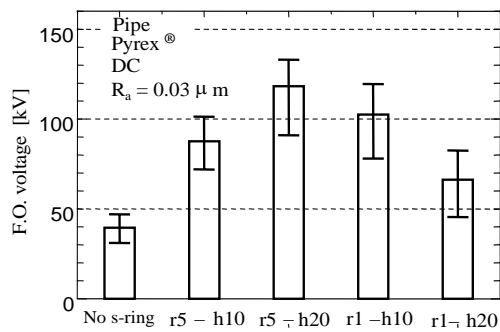


図6 リングによる放電抑制効果

率にも注意を払う必要があることがわかった。

(6) まとめ 円筒型絶縁物試料に対してシールドリングを設置した場合の帯電抑制効果を可動型静電プローブによる電荷分布の測定、陰極埋め込み型プローブによる電界の測

定および帯電のシミュレーションによる帯電分布や陰極電界の計算によって明らかにした。これにより、

①リングを設けることによって円筒内面の陰極近傍の帯電が抑制され、したがって陰極3重点近傍の電界が緩和されることがわかった。

②リングの厚さは帯電分布にほとんど影響を与えないが、その先端からの放電を抑えるためにある程度以上の先端曲率を与える必要があることも分かった。

③帯電のシミュレーションによって帯電分布や陰極電界を計算し、リング形状の予備設計ができることがわかった。ただし、高さが高いリングを用いる場合については、実際には生じない負帯電領域が現れる場合があるという問題点があり、リングの効果を過剰評価する恐れのあることがわかった。

以上により、シールドリングを設計するための基本的な指針が得られたものとする。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① O. Yamamoto, H. Hayashi, T. Wadahama, D. Takeda, S. Hamada, Y. Ohsawa, “Charging Characteristics of an Insulating Hollow Cylinder in Vacuum”, 電気学会論文誌A (IEEJ Trans. FM), Vol. 128, 606-610 (2008) 査読有り

[学会発表] (計 5 件)

- ① 秋山博則, 大澤靖治, 山本 修, 森井 浩, 「真空中ガラス試料の帯電特性」、平成21年電気学会全国大会講演論文集、札幌市 (2009年3月17日)
- ② O. Yamamoto, D. Takeda, H. Akiyama, Y. Ohsawa, H. Morii, “Factors Affecting the Charging Characteristics of Solid Insulators in Vacuum-Influence of Voltage Shape and Pressure”, Proc. of the 23rd Intel. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Vol.1, 70, Bucharest (September 2008)
- ③ T. Wadahama, D. Takeda, T. Hayashi, O. Yamamoto, Y. Ohsawa, S. Hamada and H. Morii; “Charging Characteristics of an Insulating Hollow Cylinder in Vacuum”, Proceedings of Japan-Korea Joint Symposium on ED and HVE, 270-282, Tokyo (November 15-17, 2007)
- ④ H. Akiyama, D. Takeda, T. Hayashi, O. Yamamoto, Y. Ohsawa, S. Hamada and H. Morii, “A Combined Method for Controlling Surface Charging of an

Insulating Hollow Cylinder in Vacuum”, Proceedings of Japan-Korea Joint Symposium on ED and HVE, 283-286, Tokyo (November 15-17, 2007)

- ⑤ 和田浜俊彦・竹田大輔・山本 修・大澤靖治; 「真空中円筒型絶縁物の表面帯電分布」, 平成20年電気学会全国大会講演論文集, 福岡大学 (2007年3月19日)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 修 (YAMAMOTO OSAMU)

京都大学 大学院工学研究科・講師

研究者番号 : 70093333