

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：74301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560272

研究課題名（和文） 真空中沿面放電機構の解明による絶縁設計の基礎研究

研究課題名（英文） Basic Study on Electrical Insulation by Clarifying Flashover Mechanisms along Insulating Spacer in Vacuum

研究代表者

山本 修 (Osamu Yamamoto)

公益財団法人応用科学研究所 研究員

研究者番号：70093333

研究成果の概要（和文）：真空中で高電圧導体を支持する固体絶縁支持物の絶縁は、従来経験に基づいて設計されている。本研究では、絶縁支持物の沿面放電の機構に基づいて放電電圧の理論式を導き、絶縁設計の指針を得た。支持物表面に沿う沿面放電は、支持物表面で生じる帯電現象を切っ掛けとして進展するため、特に帯電特性を実験・理論の両面から解明した。また、帯電電荷分布を勘案した理論的放電電圧と実験による放電電圧との比較検討を行い、理論式の妥当性を検証するとともに、その適用範囲についても検討を加えた。

研究成果の概要（英文）：Insulating spacers that support high voltage conductors in vacuum suffer from very low insulation performance. The insulation design so far is based on experiences including empirical formulas. In the present research we offer a theoretical formula that enables calculation of flashover voltage, which we believe to help the reliable insulation designing. As the flashover in vacuum is triggered by the charging of insulators, we have conducted theoretical and experimental studies to obtain the surface charge distribution. The charge distribution has been incorporated to establish the theoretical formula. The experimentally obtained flashover voltages and the calculation results agreed for various insulator materials and their surface conditions.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	100,000	30,000	130,000
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・電力変換・電気機器

キーワード：真空遮断器、固体絶縁物、沿面放電、帯電特性、帯電シミュレーション、放電特性、放電電圧理論式

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 真空遮断機などの真空環境を利用する高電圧機器において、絶縁支持物に対する絶縁

設計には、従来から実験式などが利用されているが、放電物理に基づいた、より信頼性の高い設計指針が望まれていた。

(2) 真空中におかれた絶縁支持物の沿面放電では、陰極から電界放出された電子が沿面に沿う二次電子なだれとなって絶縁物を帯電させ、放電の切っ掛けを与えるとされ、1960年代初頭には Boerssh らにより帯電電荷密度を与える境界条件が提案されていた。研究代表者らは、この条件に基づく電荷分布の二次元数値計算法を開発していた。しかし、計算による電荷分布の妥当性は未検証であった。

(3) 一方、代表者らは帯電を抑制するいくつかの手法、特に、指示物の表面を数  $\mu\text{m}$  の粗さにして二次電子なだれの進展を阻害する方法を開発していた。

(4) 帯電の境界条件と、二次電子なだれの電子衝撃により絶縁物の表面から放出される吸着ガスを勘案した放電電圧の半理論式が1980年代初頭に Pillai 等により提案されていた。しかし、その後、この理論の妥当性を検証する追加的な研究がなされず、放置された状態になっていた。

(5) 真空中の沿面放電では、火花化成（コンディショニング）現象が強く現れるが、極めて低い放電電圧を示す火花化成過程初期の放電機構に関し、帯電現象との関係が不明であった。

## 2. 研究の目的

(1) 火花化成過程における帯電電荷の影響を明らかにするとともに、帯電電荷分布の計算結果の妥当性ならびに二次電子なだれを前提とした帯電機構の妥当性を明らかにする。

(2) 検証された電荷分布を用いる沿面放電電圧の理論式を提案し、実験による放電電圧と対比して検証する。これにより、絶縁設計の指針を与える。

## 3. 研究の方法

(1) 表面の粗さ  $R_a$  を変えた円柱型の絶縁物（長さ  $h=5 \sim 50 \text{ mm}$ 、直径  $54 \text{ mm}$ 、 $R_a=0.03 \sim 6 \mu\text{m}$ ）を対象に、放電電圧が低い値から

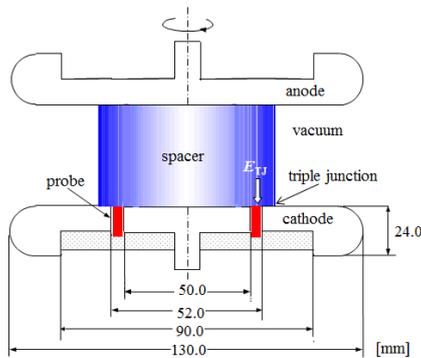


図1 円柱型試料と陰極埋め込み型プローブの配置

しだいに上昇して、飽和（安定化）するまでの火花化成過程全範囲にわたって、帯電電荷成分を含む陰極電界を、陰極埋め込み型静電プローブ（図1）を用いて測定し、放電進展における帯電の役割を明らかにする。印加電圧は直線上昇直流電圧とする。

(2) 円筒型の絶縁物（長さ  $h=50$ 、内径  $50$ 、外径  $55 \text{ mm}$ ）を用意し、真空にした内部の表面の帯電電荷を、外部に置いた可動型の静電プローブ（図2）によりスキャンして帯電状況を観測し、計算から得られるプローブ出力と対比して、帯電電荷分布計算法の妥当性を確認する。

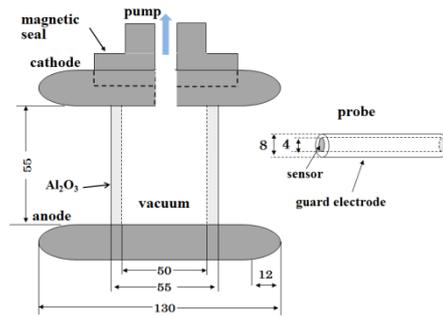


図2 円筒型試料と可動型プローブの配置

(3) 検証された電荷分布を Pillai 等の理論式に組み込む。また、代表的な絶縁物である高分子材料（アクリル）、ガラス材料（Pyrex®）、アルミナ（ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）について、それぞれ長さや表面の粗さを変えた円柱型試料を用意し、放電電圧を測定して理論式による結果と比較検討し、提案した理論式の妥当性を検証する。

## 4. 研究成果

(1) 円柱型試料の陰極電界の観測から、火花化成過程の初期から飽和にいたる全過程について、各電圧印加時の帯電の開始から放電発生まで、陰極電界の帯電電荷成分  $E_s$  は印加電圧にほぼ比例して増大することがわかった（図3）。これにより、火花化成全過程に

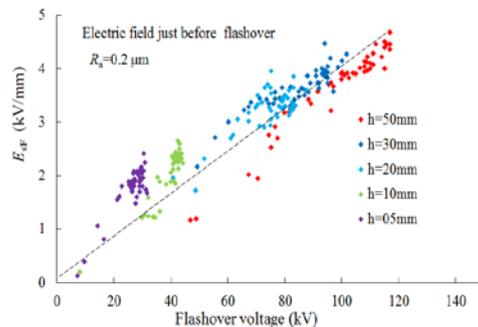


図3 放電直前における陰極電界の帯電電荷成分

において、いずれの放電においても帯電の影響が大きいことを明らかにした。

(2) 円筒型試料の帯電状況を可動プローブにより計測する一方で、帯電の境界条件を考慮して電荷分布を計算し、さらに、この電荷に対するプローブ出力を計算したところ、両者はほぼ一致した。

(3) 本研究では、電荷分布の計算手法を3次元にも拡張し、円筒型試料の内面が軸方向に帯状に帯電する場合の計算も可能にした。このような帯状の帯電を実現し、可動型プローブの測定を行って、計算と測定の結果を比較しほぼ一致する結果を得た(図4)。この結果および上記(2)の結果より、計算手法の妥当性が確認できるとともに、Boersh等の二次電子なだれに基づく帯電機構の妥当性が確認できた。

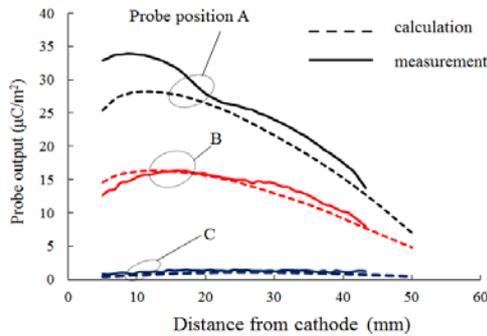


図4 プローブ出力に関する測定と計算結果の比較

(4) 3種の絶縁材料について、試料長さ( $h$ )と表面粗さ( $R_a$ )を変えた円柱型試料の放電電圧を測定した。一方、電荷分布の計算結果をPillai等の式に組み込んだ半理論式を考案した。この理論式では、各絶縁材料について放電に必要な放出ガスの密度を実験結果に合わせて求める必要があるため、ある一組の( $h, R_a$ )についてこの密度を求め、この密度を他の長さや粗さについても適用した。その結果、それぞれの絶縁材料について、考案した半理論式は実験結果とほぼ一致した(図5)。

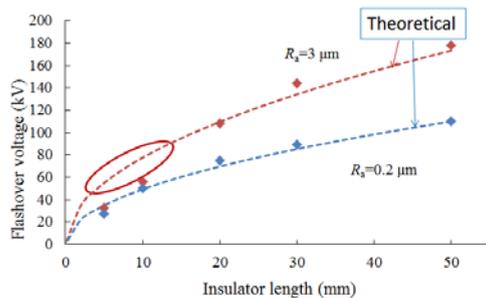


図5 放電電圧に関する理論と実験結果の比較

(5) 考案した半理論式の妥当性をさらに検証するため、帯電分布を意図的に変えた試料に対しても検討した。この試料は陰極側表面の幅  $w(\leq h)$  の範囲を滑らかにして ( $R_a=0.03 \sim 0.2 \mu\text{m}$ ) 帯電しやすくしてあり、残りの陽極側表面は粗くして ( $R_a=3 \mu\text{m}$ ) 帯電し難くしてある。帯電の幅  $w$  を変えて実験と計算による放電電圧を比較したところ、両者が良く一致する結果を得た(図6)。絶縁材料を変えた場合にも両者は一致した。この結果および上記(4)の結果より、考案した理論式は放電

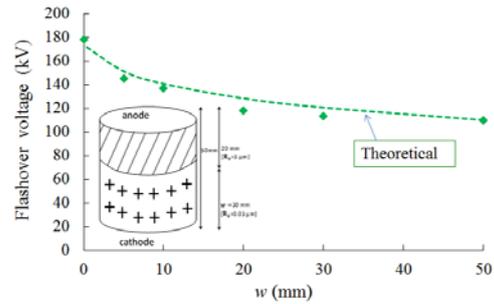


図6 帯電の幅  $w$  を変えた場合の放電電圧に関する理論と実験結果の比較 ( $h=50 \text{ mm}$ )  
電圧の推定に有効であることを確認した。

(6) 絶縁物の長さが比較的短く、表面が粗い場合には帯電が極めて少ない(陰極電界に占める帯電電荷成分の割合  $\lambda$  を測定すると、 $\lambda$  は数%以下と小さい。一方、他の条件では  $\lambda$  が 10%~60%と大きい)。このように帯電し難い条件では、図5中に楕円で囲んで示すように、放電電圧の実験と計算が一致しないことが明らかとなった。すなわち、考案した理論式は試料が比較的によく帯電するときのみ適用できることを明らかにした。

(7) 帯電し難い条件での放電機構を検討するため、電極の材料を銅(Cu)、アルミニウム(Al)、ステンレススティール(SS)の3種で放電電圧を比較する実験を行ったところ、帯電し易い条件での放電電圧は電極材料に依存しない(図7)。一方、帯電し難い条件では電極材料の影響を強く受ける(図8)。

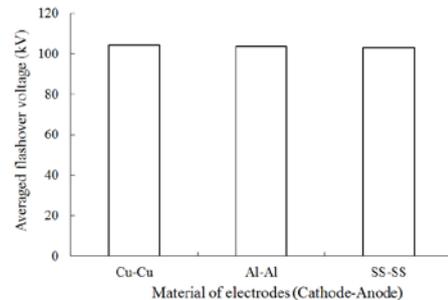


図7 帯電し易い条件での放電電圧電極材料依存性

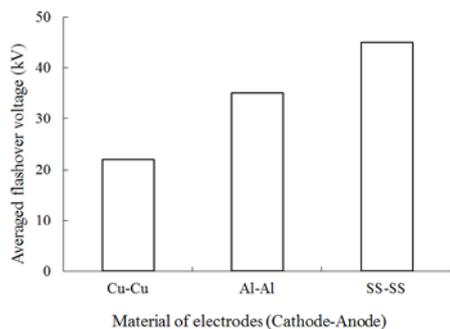


図8 帯電し難い条件での放電電圧電極材料依存性

このように、帯電し難い条件では電極材量の影響を受け、放電機構に変化が現れるという新しい知見を得た。

以上の成果(1), (2) および(3)によって本研究の目的(1)を達成した。また、成果(4), (5) および(6)によって目的(2)を達成した。さらに、成果(7)によって、沿面放電機構に関する新しい観点を導入することができた。

なお、成果(3)に関する詳細は2013年8月開催の国際会議 (ISH2013)、成果(7)に関する詳細は2013年9月開催の国際会議 (ICEPE2013) にそれぞれ投稿中である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2件)

山本 修, 「真空中の沿面放電と帯電について」, Journal of the Vacuum Society of Japan, (掲載決定) (2013)

O. Yamamoto, H. Akiyama, Y. Ohsawa, H. Morii, "Influence of Voltage Shape and Pressure on Charging Characteristics of Solid Insulators in Vacuum", IEEJ Trans, on Fundamentals and Materials, Vol. 130, 800-804 (2010)

[学会発表] (計 8件)

成瀬浩樹, 斉藤 仁, 榊 正幸, 山本 修, 「真空中におけるアルミナの帯電パラメータの検討」, 電気学会基礎・材料・共通部門大会 (2012年09月20日) 秋田大学

斉藤 仁, 榊 正幸, 成瀬浩樹, 山本 修, 「真空中におけるアルミナ円柱の耐電圧特性」, 電気学会基礎・材料・共通部門大会 (2012年09月20日) 秋田大学

Y. Shimizu, H. Morii, O. Yamamoto: "Control of surface Charge on Insulating Hollow Cylinder by Using Shield Ring in Vacuum", Proc. of The 25th International

Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Vol. 1, pp. 141-144, (Sept. 2012), Tomsk, Russia

成瀬浩樹, 梅本貴弘, 山本 修, 「真空中絶縁物表面の3次元帯電分布解析法の開発」, 平成23年電気学会基礎・材料・共通部門大会 (2011年9月21日) 東京工業大学

成瀬浩樹, 清水裕介, 山本 修, 「模擬真空バルブのシールドリングによる帯電抑制効果の検討」, 平成23年電気学会電力・エネルギー部門大会 (2011年8月30日) 福井大学

Y. Shimizu, H. Morii, O. Yamamoto, "Study on Surface Charge Distribution of an Insulating Hollow Cylinder in Vacuum", Proc. of the 24th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Vol. 1, 100-103 (2010), Braunschweig, Germany

梅本貴弘, 成瀬浩樹, 山本 修, 「真空中絶縁物表面における放電進展の観察」, 平成22年電気学会基礎・材料・共通部門大会, (2010年9月13日) 琉球大学

成瀬浩樹, 梅本貴弘, 山本 修, 「真空沿面フラッシュオーバ電圧の推定法の検討」, 平成22年電気学会基礎・材料・共通部門大会 (2010年22年9月13日) 琉球大学

成瀬浩樹, 梅本貴弘, 山本 修, 「真空沿面フラッシュオーバ電圧の推定法の検討」, 電気学会放電研究会, ED-10-130, 31-36 (2010) 奈良市民会館

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 修 (Osamu Yamamoto)  
公益財団法人 応用科学研究所 ・ 研究員  
研究者番号: 70093333

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: