42 Fluid Mapper による絶縁体表面の堆積電荷推定法

東海大・工* 青木秀憲[○] 大山龍一郎 金古喜代治Estimation Methods of Accumulated Electric Charges
along the Insulator Surface by Fluid Mapper

by

Hidenori AOKI, Ryu-ichiro OHYAMA and Kiyoji KANEKO

The authors focus the mechanism between breakdown stress and polarities of accumulated electric charges along the surface of conical spacers applied D.C. voltage, and analyzed the quantitative influence of the accumulated charges along the surface to D.C. creeping breakdown characteristics. They also discuss polarity effects of the accumulated charges along the surface by using a surface electrometer and dust figure method, and visually analyzed electric fields of the conical spacer periphery by fluid flow mapper equipments in this paper. The justification of the estimated values of the accumulated charges is inspected by the fluid flow mapper equipment. Finally, It is emphasized that relaxation phenomena of the electric field arising in the triple-junction of the spacer surface is visualized and analyzed by the fluid flow mapper in this paper.

1. まえがき 高電圧機器の絶縁支持物として用いられるスパーサには過酷な絶縁性能が要求される。従って、絶縁スパーサの沿面放電に関する基本特性を明らかにすることは極めて重要な研究課題である。円錐台形スパーサの沿面破壊特性に関しては、電極とスパーサとの間に接触角依存性があり、表面に堆積する電荷によって破壊電圧に大きな影響を及ぼすことが知られている^{1), 2)}。しかしながら、直流電圧によるスパーサ表面の堆積電荷と沿面破壊特性との関係についての報告例は比較的少ない³⁾。本実験では真空中において平板電極と円錐台形スパーサの接触角を変化させて、直流電圧に対する沿面破壊特性を求めた。また、スパーサ表面に堆積する電荷分布の状態を確認するために、スパーサ表面の電位を表面電位計により測定した。更に、ダスト図形法を用いて電荷の分布状態を観測した。これら一連の実験から得られた結果を考慮して、スパーサ表面に堆積した電荷が沿面破壊特性に及ぼす影響をより明らかにする目的でFluid Mapper装置(以下FMと略記)を用いて円錐台形スパーサの電界を可視的に解析したので報告する。

2. 実験概要 沿面破壊特性に関する実験は、Fig.1に示すようなステンレス製の平行板電極間に高さ8mmで、上面の直径が20mmのエポキシ製の円錐台形スパーサを挿入して、 10^{-4} torr以下の真空中において行った。印加した直流電圧の極性および電極とスパーサの接触角 θ については、正極性の場合を $+\theta$ 、負極性の場合を $-\theta$ として表し、 $\theta = 0^\circ \sim \pm 60^\circ$ の範囲内で変化させた。印加電圧の昇圧速度は沿面破壊が生じるまで約0.85kV/sと

* Faculty of Engineering, Tokai University, 1117, Kitakaname, Hiratsuka, 259-12 Japan

し、次の電圧印加までに約2分間の時間間隔をおいた。表面電位計による堆積電荷の測定は20回目の沿面破壊が終了した後、直ちに大気圧に戻して行った。また、ダスト図形法⁴⁾を用いた堆積電荷の観測は、大気圧においてスペーサの表面にトナを吹きかけて行った。

更に、これら実験結果を基にして、スペーサのTriple-Junction(以下T-Jと略記)近傍の電界をFMを用いて可視化した。FMによる電界の可視化法については、これまでに多くの報告⁵⁾を行っているの、ここでは簡単に記述する。FMは電極に相当する流孔や開口端などを設けた石膏板を成型し、石膏板とガラス板の間に細隙流路を構成する。流体(水)に圧力差を与えて流孔より水を吹き出させたりあるいは吸い込ませてポテンシャル流を形成させ、その流れをmethylene blueにより可視化するものである。一般にFMにおいては、媒質の境界を表すために誘電体の誘電率に対応する流れの伝導率に相当したステップを石膏板面上に設ける⁶⁾。本実験においては、誘電率が $\epsilon_2=4$ のスペーサ部分と誘電率 $\epsilon_1=1$ の2つの媒質境界面であり、スペーサの軸対

Fig. 1 Electrode arrangement

Fig. 2 Plaster slab of fluid flow mapper equipment

称性を考慮して二次元場として取り扱った。Fig. 2は接触角 θ が -60° の場合における石膏板の概略図を示す。スペーサ表面に堆積する電荷の分布領域は、表面電位計やダスト図形法などの測定結果から推定した。堆積電荷を模擬するには、石膏板面に分布源としての砂床を設ける。一般に二次元の場合、砂床部分には、細かい金属粒を充填する⁷⁾が、本実験ではFig. 2に示すように上部電極に対応している流孔の陰極側T-Jに堆積電荷の分布が存在するために、電荷の分布領域が流孔端に接することから、金属粒を充填する方式を用いることができない。従って、スペーサ部分の媒質境界に沿って直接細孔を設けた固定砂床を採用した⁷⁾。

3. 実験結果および検討

Fig. 3には沿面破壊電圧の接触角に対する依存性を示す。コンディショニング効果を考慮して破壊回数が1.1~20回における平均値を沿面破壊電圧と

Fig. 3 Characteristic of breakdown voltage versus contact angle

している。破壊電圧値は接触角 0° を中心として極性間の対称性がなく、接触角 -15° を除けば正極性側より負極性側の方が高い破壊電圧を示す。Fig. 4 はスペースサ底面から高さ4 mm の位置で表面電位計により電位を測定した結果である。円錐台スペースサの表面に堆積している電荷は接触角 $\theta = -23^\circ$ 付近を境にして、負の電荷 $<\theta<$ 正の電荷の関係で堆積している。従って、Fig. 3 で示した沿面破壊特性との関係から、表面に堆積する電荷が負である場合には破壊電圧が高くなる傾向がある。Fig. 5 は堆積する電荷の分布状態を確認するため、

接触角が -60° のスペースサにトナを吹きかけて観測した電荷分布図形である。負極性の直流電圧を印加する場合、陰極側近傍には負電荷に反応するトナの付着が多くみられた。これは表面電位計で測定した結果と比較的一致している。以上の実験事実から、沿面破壊特性に及ぼす堆積電荷の影響を明確にするために、FMを用いて円錐台スペースサの電界を可視的に解析した。

上記の実験から接触角が $\theta = -60^\circ$ の場合、陰極側のT-J近傍には負電荷が堆

積することになる。従って、本実験ではスペースサ表面に堆積する電荷と陰極側T-J周辺における電界効果を検証する目的で、陰極側から1/4の位置までスペースサ表面に電荷が一樣に堆積するものと仮定してFMにより電界を可視化した。Fig. 6 は負電荷が堆積するとき

Fig. 4 Characteristic of surface voltage versus contact angle

Fig. 5 Photographs obtained by dust figure method

Fig. 6 Flow line patterns obtained by fluid flow mapper

に、堆積電荷と同極性の電圧が印加された場合の電界をFMにより可視化した流線図形である。この場合、流孔と固定砂床の部分それぞれ吸い込みとし動作させている。可視化された流線図形は、固定砂床と流孔端との間に流線が見られないことから、この間にはと

んど圧力差がないことがわかる。また、流線図形は流孔端と開口端において良い直交性を示している。更に、両側の流れ止めに対しても平行性は良好である。流線の観測時における流れのレイノルズ数は $Re=2.18$ であり、この値は細隙流路内に定常流を生ずるのに十分な範囲にある。

次に、FMの可視化実験の結果より、スーサ表面の堆積電荷密度を求める方法について述べる。堆積電荷の密度⁽⁶⁾は静電界の電位方程式とFMの圧力方程式から、両方程式の無次元量をそれぞれ一致させることにより求められる。すなわち

$$\frac{\rho_m \ell_m^2}{\varepsilon \phi_m} = \frac{\ell_m'^2}{\sigma P_m} \cdot \frac{W_m}{\rho} \quad (1)$$

ここで ρ_m (C/m³) は電荷密度、 ℓ_m は電極間の距離、 ϕ_m は電位差基準値 (印加電圧)、 ε (F/m) は (電荷が存在している領域の) 誘電率、 ℓ_m' は流孔と開口端間の距離、 P_m は圧力差基準値、 σ は細隙伝導率、 W_m/ρ は砂床の単位面積、単位時間当りの吹き出し量の基準値である。FMの寸法や条件に関して、それぞれ $\ell_m=0.8$ (cm)、 $\ell_m'=8$ (cm)、 $\phi_m=40.6$ (kV) とし、流線観測時の圧力と流量の測定値 $P_m=1.196$ (Pa)、 $\sigma=0.0816 \times 10^{-5}$ (m⁵/N·s)、 $W_m/\rho=1.15 \times 10^{-2}$ (m³/m²·s) を考慮して堆積電荷を推定すると $\rho_m=4.236 \times 10^{-6}$ (c/cm³) = 2.644×10^{19} (個電子/m³) の値が得られる。Fig. 7 には、求められた堆積電荷密度の値を用いて計算機により有限要素法で数値計算して求めた等電位線を流線図形に重ね合わせて示してある。可視化した流線図形と有限要素法から求めた等電位線とは良く直交している。従って、観測された流線図形は電気力線 (電束) として妥当であると考えられる。すなわち、同図より明らかなように、スーサ表面の陰極側 T-J 近傍においては、堆積電荷により電界が緩和されていることが知られる。

Fig. 7 Photographs obtained by superposition of equipotential lines upon fluid flow lines

4. まとめ

真空中における円錐台形スーサの表面に堆積する電荷の影響を明らかにするために、表面電位計やダスト図形法により電荷分布の情報を得て、FM装置による電気力線の可視化実験を行った。その結果、有限要素法により求めた等電位線とFMにより可視化した流線図形の間には良い直交性が得られた。これらの実験結果から、スーサ表面の堆積電荷量を推定するとともに、T-J 周辺における電界緩和効果を明らかにすることができた。

参考文献 (1) Watson: J. Appl. Phys., Vol. 38, 2019 (1967) (2) 山本・他: 電気学会放電研究会資料, ED-86-4 (3) 山崎・金古: 静電気学会全国大会, 7p-A1, 65 (1988) (4) H. Hull: J. Appl. Phys., No. 2, pp1157 (1949) (5) 例えば金古・他: 静電学誌, 11, 29 (昭62-1) (6) 金古・大山: 流れの可視化, 7, 26, 239 (1987) (7) 金古・福岡: 電学論 A, 107, 2, 49 (1987) (8) 福岡: 「フルイド・マップ」北大図書刊行会, pp27 (1983)