交流電圧による真空中有機固体絶縁物の帯電現象

正員 山本 修* 非会員 福田 正樹*
正員 小村 広司**

Charging Phenomena of a Polymeric Insulator Exposed to AC in Vacuum

Osamu Yamamoto*, Member, Masaki Fukuda*, Non-member, Hiroshi Omura**, Member

Despite of extensive researches conducted so far on the surface flashover phenomena in vacuum, the knowledge about surface charging under AC voltage excitation is limited. This paper focuses on charging process and characteristics of the accumulated charge on an insulating spacer exposed to AC voltage in vacuum. We employed an electrostatic probe technique that allowed online measurement of electric field on the grounded electrode and thus the surface charge. The insulator specimen was made of PMMA, and was in the shape of a right cylinder with 10 mm in thickness. The side surface was polished to have an average roughness of sub microns, or roughened up to several microns. As a result, we have found that the charging is characterized by three different states: Initiation, Quasi-stable state and Stable state. With comparatively smooth surface the charging takes place at every voltage phase, accompanied by current pulses, when the applied voltage peak exceeds several kilo volts. The charge, of which polarity is positive irrespective of the voltage phase, increases in amount for a short period of time. After passing the period, the charging reaches Quasi-stable state, where the probe signal consists of DC and periodical components. Within several minutes after the Quasi-stable state has been established the charging turns into Stable state, where the periodical component disappears and only the DC component remains. At the Stable state current pulses also disappears, meaning that the charging activities are suspended until higher voltages are applied. At near the triple junction on the grounded electrode, the DC component almost equals to or can be higher than the applied one. Correspondingly to our previous results with DC voltage excitations, roughening the insulator surface results in decrease in charge magnitude, thus increase in the insulation strength.

キーワード：交流，帯電特性，フラッシュオーバー特性，PMMA，表面粗さ，プローブ，真空

Keywords：AC, charging characteristics, flashover, PMMA, surface roughness, probe, vacuum

1. はじめに

主要な電力用遮断器として SF_6 ガスを用いるガス遮断器 (GCB) と真空を用いる真空遮断器 (VCB) がある。GCB に使われる SF_6 は地球温暖化係数が大きいために削減が求められている。このガス遮断器の代替として高電圧、大容量の真空遮断器の開発が望まれる。このうち真空遮断器の高電圧化には真空中の絶縁特性、特に絶縁の弱点となる真空バンプの沿面放電特性とその機構を把握することが極めて重

要である。

一般に、真空中におかれた固体絶縁物の沿面に沿う放電は陰極、固体絶縁物および真空部が形成する三重点から電界放出された電子が絶縁物の表面に衝突し、二次電子なだれ (SEEA) を発生して絶縁物表面を正に帯電させる。さらに、この帯電が電界電子放出を増強するとともに表面吸着ガスの放出を誘起し、そのガスの中で絶縁破壊が生じると考えられている⁽¹⁾。直流電圧やパルス電圧印加による帯電・放電特性^{(2)~(6)}については、その抑制方法も含めてかなりの程度まで明らかになってきたが、交流電圧印加時の帯電現象や帯電特性については最近になって注目され始めたといっても過言ではない^{(7)~(9)}。

ここでは交流電圧による帯電現象に着目し、これまでに筆者等が直流電圧の帯電現象の観測のために開発した静電

* 京都大学工学研究科電気工学専攻
〒615-8510 京都市西京区京都大学桂
Dept. of Elect. Eng., Kyoto University
Kyoto-daigaku Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8510
** 関西電力(株)電力技術研究所
〒661-0974 尼崎市若王子 3-11-20
General R & D Center, Kansai Electric Power Co Inc.
3-11-20, Nakohji, Amagasaki 661-0974

プローブ法⁽²⁾を適用して研究を行った。実際の真空バルブの材料にはアルミナセラミックスやパイレックスガラスが用いられ、その形状は円筒に近い。しかし、ここでは基礎的な研究の手始めとして材料は加工の容易なアクリル (PMMA) とし、形状は円柱とした。その結果、位相変化に伴う交流電圧に特有の帯電現象が明らかになってきたので報告する。

2. 実験装置と方法

図 1 に実験装置を示す。タンク内は 1×10^{-3} Pa 程度の真空状態に保たれている。フラッシュオーバ電圧の測定、帯電現象の観測ともに交流電源を手動で操作し印加電圧を上昇させた。帯電現象の観察ではステップ状に電圧を上昇させ、フラッシュオーバ電圧の測定では約 0.4 kV/s の速度で上昇させた。周波数は 60 Hz であり、印加電圧の表示はすべてピーク値とした。

電極とプローブの配置を図 2 に示す。これらは直流電圧印加時の実験系と同じである。高電位・接地両電極ともにアルミニウム製の円盤形であり、それぞれ直径 130 mm、

図 1 実験装置

Fig. 1. Experimental set up.

図 2 電極系とプローブ

Fig. 2. Electrodes and probe arrangement.

厚さ 24 mm で円周部は丸めてある。陰極には内側直径が 50 mm、幅が 1 mm のリング状プローブが埋め込んである。このプローブと電極との間には PET フィルムを挿入してあり、接地極部分とは絶縁している。プローブ部分を除いた接地極部は 50 Ω の抵抗を通して接地してあり、帯電に伴う電流を観測することができる。

実験に用いた試料絶縁物 (スペーサ) は PMMA 製で、直径が 54 mm の円柱形状であり、高さは 10 mm である。これまでの直流電圧印加による研究から、スペーサの表面粗さが帯電特性およびフラッシュオーバ特性に強く影響することが分かっているので、ここでも以下の 3 種類の表面粗さを用意した。すなわち、機械加工ののち表面にバフ研磨を施したスペーサ、バフ研磨を施していないスペーサ、粒度 80 番の紙やすりで表面加工を施したスペーサである。これら加工後の平均表面粗さ R_a はそれぞれ約 $0.17, 0.34, 3.0$ μm である。

なお、スペーサの直径はプローブの外側直径よりも 2 mm 大きいので、陰極とスペーサを同軸上に配置したとき、スペーサがプローブ表面を完全に覆う。これにより、スペーサ表面や空間からプローブへの実電荷の流入を防ぐことができるので、このプローブは静電誘導による電荷のみを観測する。プローブの信号を付加コンデンサとプローブ面積を考慮して電界に換算する。ここではこれを E_{TJ} で表し、印加電界成分 E_g と帯電電荷成分 E_s の和となる⁽²⁾。

3. 帯電現象

〈3・1〉 帯電の開始と再開 図 3 に帯電が開始した時の印加電圧波形、プローブ波形、電流波形を示す。電圧波

図 3 帯電開始におけるプローブ波形、電流波形 (PMMA, $R_a = 0.34$ μm, $V_{ap} = 5.8$ kV)

Fig. 3. Wave forms of probe signal and current at the beginning of charging.

形とプローブ波形とは、帯電が生じない低電圧（例えば 1 kV）で、大きさおよび位相が完全に一致するようにオシログラフ上で調整してある。したがって、電圧波形はプローブ信号の印加電界成分と見なして良い。図 3 の例では正位相のピーク近傍（ピーク値 5.8 kV）で最初のパルス電流が生じている。この電流が発生するまでの電圧波形とプローブ波形は完全に一致していることから、プローブの信号成分は印加電界成分 (E_g) のみである。電流は電圧の位相が負に反転してから再びパルス状に流れている。このように電流が流れるとプローブ波形に歪みが生じる。そこで、プローブ波形から印加電界成分を差し引いて、帯電電荷成分 (E_s) のみの波形を求めて同図に示している。これによると E_s は電流パルスに対応してステップ状に上昇している。これらの波形においてパルス電流の極性は電圧位相に応じて正・負に変化するが、対応する E_s の極性は常に正（増加）であり、位相に関わらず正に帯電することが分かる。このように、 E_s は位相と無関係に時間とともに正方向に増えることに注意する。

帯電が開始したのち電圧をそのまま一定に保つと、〈3・2〉節に後述するように、各位相でパルス電流が流れ、それに伴って E_s が増減を繰り返す。ただし E_s は常に正であり、平均的な電界はほぼ一定である（準安定状態）。また〈3・3〉節に後述するように、電圧一定でさらに数分間電圧を一定に保つとパルス電流は流れなくなり、帯電活動は休止する。このとき陰極電界は直流のようにほぼ一定値となる（安定状態）。

電圧を一定に保って帯電が休止した状態から帯電を再開させるには印加電圧を上昇させる必要がある。図 4 は電圧を一定に保った状態から 7 kV に上昇させたときの様子を示す。同図で $t=25$ ms まではパルス電流が生じておらず帯電電荷成分も一定であり、上述の休止状態が続いている。 $t=25$, 34, 42 ms 付近でそれぞれ位相に応じて正負のパルス電流が流れ、それに応じて電界 E_s はステップ状に上昇している。なお、電圧上昇から帯電が再開するまでにはある遅れ時間が存在することが図 4 の波形からわかる。

〈3・2〉 準安定状態 図 5 は電圧ピーク値を約 13.2 kV に上昇して帯電が再開してから数秒後に観測したプローブ波形、電流波形である。この例では、正負それぞれの電圧位相においてピークを迎えるまでに複数のパルス電流が流れる。帯電電荷成分 E_s は直流成分と微小変化分 ΔE_s からなり、正位相では電流に対応して増加、負位相では減少している。したがってこの微小変動は印加電圧に同期している。ここではこの状態を準安定状態と呼ぶ。このような状態が数分続いたのち、前述のように電流パルスの発生状況からみて帯電は休止期に移行する。

〈3・3〉 安定状態 帯電の休止期には、図 6 に示すように、 E_s は直流のように変動のない一定値となる。また、ここでは波形を省略するが、電流は充電電流のみとなりパルス電流は流れない。この例は電圧を 20 kV とし、準安定状態が達成されてから数分後に観測したものである。こ

図 4 帯電再開時のプローブ波形、電流波形 (PMMA, $R_a = 0.17 \mu\text{m}$, $V_{ap} = 7 \text{ kV}$)

Fig. 4. Wave forms of probe signal and current when the charging restarts after increasing applied voltage.

図 5 準安定状態のプローブ、電流および電圧波形 (PMMA, $R_a=0.17 \mu\text{m}$, $V_{ap}=13.2 \text{ kV}$)

Fig. 5. Wave forms of probe and current when the charging reaches at Quasi-stable state.

では、この状態を帯電の安定状態と呼ぶ。安定状態では、プローブの位置の電荷成分による電界は印加電界にほぼ比例して増え、同図の例のように印加電界に匹敵する大きさにもなり得る。さらに三重点に近い位置ではこれよりも高

図6 安定状態のプロブおよび電圧波形
(PMMA, $R_a=0.17 \mu\text{m}$, $V_{ap}=20 \text{ kV}$)

Fig. 6. Wave forms of probe signal and voltage when the charging is suspended after Quasi-stable state.

くなることが予想される (図9 参照)。印加電圧をステップ上に上昇させると、再開、準安定、安定 (休止) の3状態が繰り返される。

4. 表面粗さと帯電強度

帯電の強さを表すため、ここでは帯電強度として印加電界に対するプロブ信号の大きさ、すなわち E_{TJ} / E_g をとり、試料の表面粗さ R_a との関係調べた。図7が印加電圧ピーク値を 20 kV としたときの測定値で、直流電圧印加による結果^③と併記している。図より、表面粗さを大きくすると帯電強度は小さくなり、 R_a が 2 ないし $3 \mu\text{m}$ より大きくなると帯電が困難になる。また、電圧としてピーク値を採れば、直流電圧印加による帯電強度とほとんど同じである。

5. 考察—準安定状態での帯電遷移—

図5で示したように準安定状態では帯電成分に微小変化 ΔE_s が生じる。すなわち、負位相において帯電電荷成分 E_s は減少する。これは図3および図4で示した帯電開始および再開時の E_s が負位相でも上昇することと相反する。ここでは、帯電電荷分布を計算するとともに、それによる接地電極表面の電界を計算して、この理由を検討する。

〈5・1〉 電荷分布

(1) 計算法 二次電子なだれ (SEEA) 機構によれば、陰極から放出された電子はスペーサ表面で二次電子なだれを形成し、表面を帯電せしめる。電圧を維持すれば、一定の時間を経た後に帯電は平衡状態⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾となり、電荷の分布に時間的変化が起らない。平衡状態の電荷分布は、材料の二次電子放出特性と電界計算とによって求める。ここで用いた計算法は回転対称二次元近似であり、その詳細は文献⁽¹⁰⁾に述べている。

(2) 位相による電荷分布の変化 図8は印加電圧を

図7 帯電強度と表面粗さ

Fig. 7. Relation of charge magnitude with surface roughness.

図8 正負位相での平衡状態の電荷分布

Fig. 8. Calculated surface charge distributions for positive and negative phase.

$V_{ap} = +20 \text{ kV}$ または -20 kV として電荷分布を計算した結果である。図のように、 $+20 \text{ kV}$ の場合、電荷の極性は表面に沿うどの位置でも正である。その密度は接地極 (陰極) 近傍の表面で大きく、高電位極 (陽極) 近傍で小さい。 -20 kV の場合も正電荷であり、接地極 (陽極) 近傍の密度が小さく高電位極 (陰極) で大きくて、 $+20 \text{ kV}$ の分布と対称になっている。対称となることは、試料が円柱形状であり、電圧位相 (極性) の変化によって陰陽両極が交互に入れ替わるだけであることから予想されることである。

〈5・2〉 位相による接地電極上の電界変化 プローブは接地電極に取り付けてあるので、正位相ではプローブは電荷密度の大きい側、負位相では密度の小さい側にある。これによってプローブ信号に位相による違いが生じると予想できる。このプローブ信号の大きさ (帯電電荷成分) を調べるため、接地電極表面の電界分布を計算した。

図 9(a), (b)がこの結果である。帯電電荷密度、したがって電界強度は印加電圧値に比例する⁽¹¹⁾ので、この図では印加電界により規格化して示してある。図のように接地極の電界は正位相で高く、負位相で低い。

〈5・3〉 位相とプローブ信号の関係 図 9 の電界分布を基にしてプローブ出力（図中距離-1～-2 mm の範囲の面積加重平均値）を求めると、正位相で $E_s^+/E_g = 0.69$ ，負位相で $E_s^-/E_g = 0.47$ となる（ E_s^+ ， E_s^- はそれぞれ帯電電荷成分の正位相での値および負位相での値とする）。一方、図 5 から実測値は正位相で $E_s^+/E_g = 0.64$ ，負位相では $E_s^-/E_g = 0.51$ となる。このように、正位相から負位相への変化の傾向に関し、計算結果と測定結果とはほぼ一致する。

以上により、準安定状態におけるプローブ信号の増減は、電圧位相（極性）に対応した電荷分布の遷移に起因すると考えられる。

パルス電流は位相変化による電荷分布の遷移に対応して流れたものと考えられる。なお、帯電に伴って正負位相でそれぞれ複数のパルス電流を伴うが、これは試料の円周方向の帯電分布が一回のパルス電流ごとに一樣とならず、部

(a) Positive phase (cathode surface).

(b) Negative phase (anode surface).

図 9 位相による接地極表面の電界分布の変化
Fig. 9. Calculated electric field distributions on the grounded electrode (Probe situates from -1 to -2 mm on the horizontal axis).

分的であり、円周方向の場所が異なる複数の帯電現象（パルス電流）が重なって一様に近づくためと考えられる。

帯電の開始および再開時には、正負位相それぞれにて上昇後の印加電圧に対応する帯電平衡状態の分布に至るまでパルス電流の発生を伴って電荷が増える。したがって、プローブに現れる帯電電荷成分 E_s は負位相であっても増加することになる。

以上のように、負位相における E_s は印加電圧上昇時（帯電開始または再開時）には平衡状態まで増加、電圧を一定に保つ（準安定状態）と正位相からの分布の遷移のために減少となる。なお、図 5 の E_s 波形にみられるように遷移過程で $E_s = 0$ の期間がないので、電荷は一旦中和されるのではなく、前の位相における平衡状態の電荷分布から次第に変化していくものと推察される。準安定状態から安定状態への移行に関する機構は不明であり、今後の課題である。

6. フラッシュオーバー特性

表面粗さの異なる PMMA スペーサについて、それぞれフラッシュオーバー電圧を 10 回測定し、これらを平均して平均フラッシュオーバー電圧を調べた。この結果を、直流電圧に対して同様に求めた結果⁽³⁾とともに図 10 に示す。図の交流電圧による結果から、表面粗さ R_a が $0.17 \mu\text{m}$ と $0.34 \mu\text{m}$ でのフラッシュオーバー電圧は約 30 kV でほぼ同じである。しかし、 R_a が $3 \mu\text{m}$ では約 51 kV であり、約 1.7 倍に上昇する。これは直流電圧による結果とほぼ同様である。これらより、表面を数 μm 以上に粗くすることで交流、直流ともにフラッシュオーバー電圧を上昇させることができる。これは図 7 のように帯電が抑制されるためと考えられる。ただし、交流電圧におけるフラッシュオーバー電圧は表面が滑らかな場合は直流印加時のそれとほぼ等しいが、粗さが大きくなると直流より 10 % 程度低い。

図 10 フラッシュオーバー特性

Fig. 10. Flashover characteristics with surface roughness.

7. まとめ

交流電圧印加による真空中の円柱型絶縁物表面の帯電現象を電極埋め込み型の静電プローブと電流観測によって調べた。また電荷分布を計算し、これらの結果を勘案して以下のことがわかった。

(1) 電圧位相にかかわらず帯電電荷の極性は正である。電圧上昇時には帯電が開始(再開)し、正負位相の平衡状態に向けて帯電電荷は増える。

(2) 電圧ピーク値を維持したとき、電荷分布は正位相と負位相それぞれに対応する電荷分布に遷移をくりかえし、準安定状態となる。

(3) 電圧ピーク値を維持したまま数分の時間が経過すると電荷分布の遷移が起こらなくなり、安定状態となる。

電圧をステップ状に上昇させるとき、これら3状態が繰り返される。なお準安定状態におけるプローブ信号の変化は、電荷分布の遷移を考慮した計算結果とほぼ一致した。また、試料の表面粗さを変えた実験の結果から、表面粗さが数 μm 以上になると帯電が起こりにくくなり、絶縁耐力も向上した。これらは直流電圧による結果と一致する結果である。

今後の課題として準安定状態から安定状態への進展機構の解明が残されている。また、本論文では絶縁物材料として加工の容易なPMMAを用いたが、ガラス材料についての研究も行っており、別の機会に報告する予定である。

(平成16年12月7日受付,平成17年2月24日再受付)

文 献

- (1) H. C. Miller: "Flashover of Insulators in Vacuum", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. EI-28, No. 4, p.512 (1993)
- (2) O. Yamamoto, T. Takuma, and Y. Tanabe: "Real-Time Observation of Surface Charging on a Cylindrical Insulator in Vacuum", *IEEE Trans. Diel. & Electr. Insul.*, Vol.5, pp.961-965 (1998)
- (3) O. Yamamoto, T. Takauma, S. Hamada, Y. Kakehashi, S. Ikoma, K. Nishimura, and T. Shioiri: "Influence of Surface Roughness on Charging of an Insulating Spacer in Vacuum", *TIEE Japan*, Vol.119-A, No. 10, pp. 1221-1228 (1999-10) (in Japanese)
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」, 電学論A, 119, 10, pp.1221-1228 (1999-10)
- (4) O. Yamamoto, T. Takuma, Y. Kakehashi, and S. Ikoma: "Delay characteristics of surface charging on a cylindrical Insulator in Vacuum", *IEEE Trans. Diel. & Electr. Insul.*, Vol.7, pp. 812-817 (2000)
- (5) O. Yamamoto, T. Takuma, M. Fukuda, S. Nagata, T. Harasawa, and T. Sonoda: "Improving Withstand voltage by Roughening the Surface of an Insulator in Vacuum", *IEEE Trans. Diel. & Electr. Insul.*, Vol. 10, pp.550-556 (2003)

- (6) K. Suzuki, K. Kato, Y. Hakamata, and H. Ohkubo: "Real-time and High-speed Measurements of Charging Processes on Dielectric Surface in Vacuum", *IEEE Trans. Diel. & Electr. Insul.*, Vol. 10, pp.563-568 (2003)
- (7) O. Yamamoto, M. Fukuda, H. Sano, and T. Sonoda: "Charging Phenomena of an Insulating Spacer Exposed to A.C. in Vacuum", The Papers of Joint Technical Meeting on Electrical Discharge, Dielectrics and Electrical Insulation and High Voltage Engineering, IEEJ, ED-04-20, pp.43-48 (2004) (in Japanese)
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パーサの帯電現象」, 電気学会放電研資, ED-04-20, pp.43-48 (2004)
- (8) Y. Yamano, S. Kobayashi, and Y. Saito: "Measurement of Surface Charge Distribution on Insulating Film Before and After Surface Flashover Events in Vacuum", Proc. of 2004 Annual Conf. of Fundamentals and Materials Society, IEE Japan, p. 445 (2004) (in Japanese)
山納 康・小林信一・齊藤芳男:「真空中における沿面放電前後の絶縁物上の帯電測定」, 2004 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, p.445 (2004)
- (9) G. J. Zhang, W. B. Zhao, and Z. Yan: "Optical Investigation of ac Preflashover of Alumina Ceramic in Vacuum", *IEEE Trans. Diel. & Electr. Insul.*, Vol. 11, pp. 498-505 (2004)
- (10) O. Yamamoto, T. Hara, I. Nakanishi, and M. Hayashi: "Monte Carlo Simulation of Surface Charge on Angled Insulators in Vacuum", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. EI-28, pp.706-712 (1993)
- (11) H. Boersch, H. Harmish, and W. Ehrlich: "Surface discharge across insulators in vacuum", *Z. Angew Phys.*, Vol. 15, pp.518-525 (1963)

山 本 修

(正員) 1948年2月22日生。1970年3月立命館大学理工学部数学物理学科卒業。京都大学工学研究科助手。工学博士。SF₆ガスおよび混合ガス絶縁、鉄塔雷サージ特性、混合ガスの分離回収法、真空中の沿面絶縁などの研究に従事。IEEE 会員, 放電学会会員。

福 田 正 樹

(非会員) 1979年3月11日生。2001年3月京都大学工学部電気電子工学科。2003年3月京都大学工学研究科電気工学専攻終了。2003年4月(株)大阪ガスに入社, エンジニアリング部に所属。分散型電源に関する技術開発にたずさわって現在にいたる。

小 村 広 司

(正員) 1960年9月24日生。1979年3月島根県立松江工業高校電気科卒業。同年4月関西電力(株)入社。現在, 同社電力技術研究所に勤務。雷サージ現象解析および変電機器に関する研究に従事。