

論 文

帯電した高分子フィルムと高電圧金属とが作る
微小間隙における放電開始特性

山野 芳 昭*

(1992年11月18日受理)

Initiation of Spark Discharges in a Small Gap between High Voltage Sphere Metal Electrode and Corona Charged Organic Film

Yoshiaki YAMANO*

(Received November 18, 1992)

Initiation of spark between dc high voltage metal sphere electrode and corona charged organic film was studied in air at room temperature. The gap length was changed from 0.2 mm to 2.5 mm. The films tested were PET, PS, PP and PTFE. When an applied voltage to the sphere metal electrode was opposite polarity to the charge on the film, an electric field strength at the spark with the negatively charged film depended on the material of the film. With the positively charged films, the field strength was less dependent on the materials. The field strengths with negatively charged PET and PS were higher than those with negatively charged PTFE and PP, which were almost the same as that for the spark between two metal electrodes. When the applied voltage was the same polarity as the charged film, the material dependence of the spark voltage was not recognized. The experimental results were discussed by the α - and γ -processes in Townsend breakdown mechanism. In the case of the spark between the negatively charged film and positive sphere electrode, it was estimated that the dependence of the field strength on the film material is due to the existence of electrons on the film.

1. はじめに

高電圧絶縁機器において絶縁物と高電圧導体とが接触する面には、わずかな隙間（微小間隙）が形成されやすい。機器の運転中に微小間隙から部分放電が発生すると、それが原因となって絶縁物の劣化をきたすことがある¹⁾。また、電気・電子機器内に組み込まれる高電圧装置自体の小型化がすすむにつれ、高電圧導体（高電圧リード線など）の取り廻しなどに必要な余裕空間がなくなり、高電圧導体と絶縁物との間に微小間隙が形成されやすくなる。一つの機器内にデジタル IC 回路部と高電圧回路部とが組み込まれている場合などは、微小間隙で発生した放電によるノイズが原因となって、デジタル IC 回路部の誤動作や破壊が生じることもある²⁾。このよう

に、絶縁物表面と高電圧金属導体とが作る微小間隙で発生する放電は、高電圧絶縁機器や電気・電子機器の信頼性を低下させる原因の一つとなっている。

絶縁物表面と高電圧導体とが作る微小間隙における部分放電開始電圧は、その間隙の大きさ（ギャップ長）からパッシュンの法則を用いて予測することが多い³⁾。パッシュンの法則自体は、平等電界を形成する金属電極間で生じる放電を対象としている。しかし微小間隙を形成する絶縁物表面は、放電が発生していない状態であっても、なんらかの原因で帶電している場合が多い。また、負帯電の絶縁物表面では、帶電電荷がイオンの場合と電子の場合とで放電開始特性が異なることも考えられる。したがって、絶縁物表面と高電圧金属導体とが作る微小間隙における放電を単純に金属間隙における放電で模擬することはできない。

このような観点から、本研究では、帶電した高分子フィルムと高電圧金属電極との間の微小間隙における放電開始特性について検討を行った。具体的には、コロナ放電により帶電させた数種類の高分子フィルムと直流高電

キーワード：帶電フィルム、帶電電荷、微小ギャップ放電、静電気放電

* 千葉大学教育学部技術科 (263 千葉市稲毛区弥生町 1-33)
Department of Engineering, Faculty of Education,
Chiba University, 1-33 Yayoichou, Inage-ku,
Chiba-shi, 263 Japan

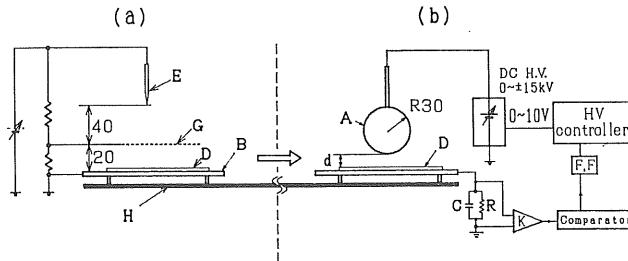


図 1 実験装置

(a) 帯電装置, (b) 放電電圧測定装置
 A : 金属球電極(鉄), B : 金属板(銅), D : 高分子フィルム試料, E : 針電極,
 G : 金網, H : ガイドレール, C, R : 検出インピーダンス, (500 pF, 1 kΩ),
 d : 電極間隔, FF : フリップフロップ, K : 増幅器(周波数範囲: DC~30 MHz)
 単位: mm

Fig. 1 Experimental apparatus.

- (a) Apparatus for corona charging.
- (b) Apparatus for measurements of discharge inception.
 A : Metal sphere electrode (Steel), B : Metal plate (Copper), D : Organic film, E : Needle electrode, G : Grid, H : Guide rail, C, R : Detecting impedance (500 pF, 1 kΩ), d : Gap distance, FF : Flip-flop circuit, K : Amplifier (Frequency band : DC~30 MHz), unit : mm

圧を印加した金属球電極との間の大気中における微小間隙の放電開始電圧について、同一ギャップ長における金属電極間の放電特性と比較しながら検討を行った。

帯電した絶縁物表面と金属導体との間で生じる放電に関する従来からの研究では、帯電した高分子フィルムと接地導体との間で生じる放電(静電気放電)を対象としている場合が多い⁴⁾。これらの研究では、静電気放電に伴って発生する電流あるいはノイズの特性や、放電後にフィルム上に残留している電荷の分布状態を検討している。しかし、接地金属電極と帯電フィルムとの間で生じる放電では、帯電フィルムの極性に対して接地金属電極は常に反対の極性となり、帯電フィルムと金属電極とが同一の極性となる場合の放電を発生させることはできない。したがって接地金属電極を用いた研究結果のみからでは、本研究の目的である高電圧金属と帯電した絶縁物表面との間の放電開始特性を十分に検討することはできないと考えられる。

2. 実験方法

図 1 に実験装置を示す。実験装置は高分子フィルム試料を所定の電圧に帯電させる装置(図 1(a))、及び帯電させたフィルム試料と金属球電極との間での放電電圧を測定する装置(図 1(b))とから構成されている。使用した高分子フィルム試料の材質は、ポリエチレン(PET, 50 μm 厚, 帝人製 FLL)、ポリスチレン(PS: 60 μm 厚, 三菱化成製 DXL164)、ポリプロピレン(PP: 30 μm 厚, 帝人製 パンライト AA) 及びテフロン

(PTFE: 50 μm 厚, ニチアス(株)製 No. 9007)である。これらのフィルムを 10 × 10 cm の大きさに切り、メタノールで洗浄し、デシケータ内で 24 時間以上乾燥した後に実験に使用した。

実験は温度 20~23°C、相対湿度 40~50% の室内大気中で行った。

2.1 フィルム試料の帯電

フィルム試料の帯電電圧は、図 1(a)に示すステンレス製金網(G)によって調節した。本実験における帯電電圧は、最大 ±1,750 V である。帯電時間は、針電極に ±7 kV を印加した状態で 10 分間とした。帯電電荷の分布状態を表面電圧計(モンローエレクトロニクス社製 MODEL-260)で測定した結果、フィルムの中心から半径 30 mm の範囲内における帯電電圧のはらつきは、1,000 V 帯電時で ±50 V 以内であった。(これを帯電電荷密度に換算すると、たとえば $\epsilon_r=3.2$ の PET フィルムでは、約 $(5.67 \pm 0.28) \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$ の範囲で帯電電荷が分布していることになる。) また、フィルムを ±1,750 V に帯電させた後、実験室中に 10 hr 放置しても、帯電電圧の減衰量は初期値に対して 10% 以内であった。

2.2 金属球電極による放電開始電圧の測定

帯電させたフィルムを試料台ごとガイドレール上(H)で横にスライドさせ、あらかじめ所定のギャップ長(図 1(b)の d)に設定した金属球電極の下にセットした。実験を行ったギャップ長(d)は 0.2 mm~2.5 mm の範囲である。金属球電極への印加電圧は、図 1(b)の "HV"

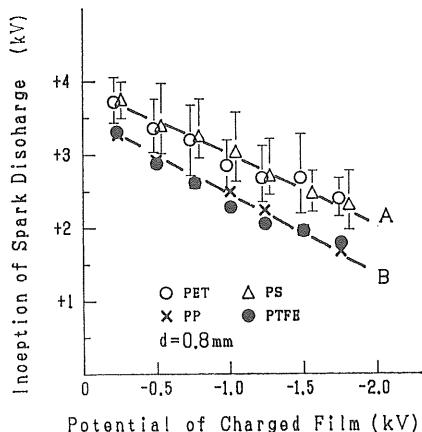


図 2(a) 帯電フィルムの電圧と球電極の電圧とが反対極性の場合における放電開始電圧と帶電電圧との関係
(ただし, (−フィルム) * (+M 球) での関係)
ギャップ長 (d) = 0.8 mm
A : (−PET) * (+M 球) 及び (−PS) * (+M 球)
での関係
B : (−PTFE) * (+M 球) 及び (−PP) * (+M 球)
での関係

Fig. 2(a) Relation between inception of spark discharge and surface potential of charged film, in the case where charged film and sphere electrode are the opposite polarities.
(At (−Film) * (+M Sphere)
Gap distance (d) = 0.8 mm
A : At (−PET) * (+M Sphere) and
(−PS) * (+M Sphere)
B : At (−PTFE) * (+M Sphere) and
(−PP) * (+M Sphere)

controller”からの信号で制御されている。印加電圧の上昇速度は 170 V/s 一定である。ギャップに 0.5 pC 以上の放電電荷をもつ放電が発生すると、印加電圧の上昇が自動停止する。その時の印加電圧の値を放電開始電圧とした。放電開始電圧の測定は、同一条件において 20 回を行い、それらの平均をデータとした。また、使用するフィルム試料は各測定ごとに新しいものと交換した。

2.3 放電後におけるフィルム上の帶電電荷分布の観測

放電が終了した直後のフィルム上に残留している電荷分布状態をダストフィギュアによって観測した。使用した帶電粉は、正極性の帶電領域に赤色粉が、負極性の帶電領域に青色粉が付着するものである⁵⁾。

以下においては簡単のため、たとえば帶電フィルムを(帶電フィルム)、負帶電フィルムを(−フィルム)、正帶電 PP フィルムを(+PP)、高電圧金属球電極を(M 球)、正極性高電圧金属球電極を(+M 球)、接地金属板を(Mo 板)のように表記する。また、たとえば(帶電

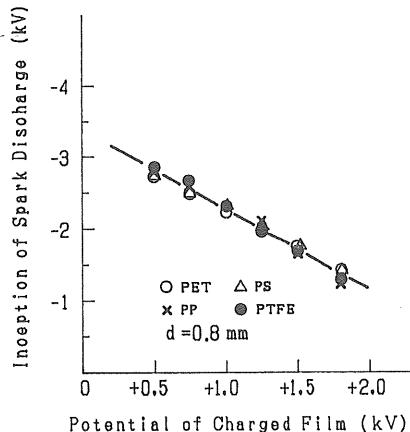


図 2(b) 帯電フィルムの電圧と球電極の電圧とが反対極性の場合における放電開始電圧と帶電電圧との関係
(ただし, (+フィルム) * (−M 球) での関係)
ギャップ長 (d) = 0.8 mm

Fig. 2(b) Relation between inception of spark discharge and surface potential of charged film, in the case where charged film and sphere electrode are the opposite polarities.
(At (+Film) * (−M Sphere))
Gap distance (d) = 0.8 mm

フィルム)と(M 球)との組み合わせによる放電を(帶電フィルム) * (M 球)での放電、同様に (−PET) と (+M 球)との組み合わせによる放電を (−PET) * (+M 球)での放電と表記する。

3. 実験結果及び考察

3.1 帯電電圧と放電開始電圧との関係

3.1.1 帯電電圧と金属球電極への印加電圧とが反対極性の場合

図 2(a)、図 2(b)に帶電電圧と放電開始電圧との関係を示す。これらは、帶電電圧と金属球電極への印加電圧とが反対極性の場合におけるものである。図中のデータはギャップ長が 0.8 mm の場合である。

図 2(a)に示すように、(−フィルム) * (+M 球)における放電開始電圧は、使用するフィルムの材質によって変化する。すなわち、(−PET) * (+M 球) 及び (−PS) * (+M 球) の放電開始電圧(図中の A)は、(−PTFE) * (+M 球) 及び (−PP) * (+M 球) での放電開始電圧(図中の B)よりも約 500 V ~ 700 V 高い値を示す。(−PET) * (+M 球) 及び (−PS) * (M 球) の測定値は、各プロットとも約 ±500 V 以上のばらつきを持っている。それに対して、(−PTFE) * (+M 球) 及び (−PP) * (+M 球) におけるばらつきは、図には示していないが、±50 V 以内と極めて少ない。

一方、(+フィルム) * (−M 球) での放電開始電圧は、

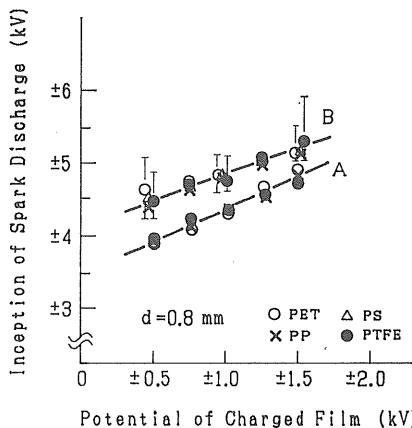


図3 帯電フィルムの電圧と球電極の電圧とが同極性の場合における放電開始電圧と帶電電圧との関係
ギャップ長=0.8 mm

A : (-Film) * (+M Sphere)
B : (+Film) * (+M Sphere)

Fig. 3 Relation between inception of spark discharge and surface potential of charged film, in the case where charged film and sphere electrode are the same polarities.
Gap distance (d) = 0.8 mm
A : At (-Film) * (+M Sphere), B : At (+Film) * (+M Sphere)

図2(b)に示すように、使用するフィルム材料による変化はない。測定値のばらつきは各フィルムとも ± 50 V 以内と極めて小さい。

3.1.2 帯電電圧と金属球電極とが同極性の場合

図3は、帯電電圧と金属球電極への印加電圧とが同極性の場合における帯電電圧と放電開始電圧との関係を示したものである。図中のデータはギャップ長が 0.8 mm の場合である。図に示すように、(+フィルム) * (M球) での放電開始電圧 (図中のB) 及び (-フィルム) * (-M球) での放電開始電圧 (図中のA) とともに、使用するフィルム材料による変化は見られない。しかし、前者の放電開始電圧は後者のそれよりも高い値を示す。測定値のばらつきも前者の方が大きい。(図中Aの測定値のばらつきは各フィルムとも ± 50 V 以内である。)

図2(a)、図2(b)及び図3から、ギャップ長 0.8 mm においては、(-フィルム) * (+M球) の場合の放電開始電圧は使用するフィルムの材質によって変化することがわかった。その他の場合における放電開始電圧はフィルムの材質による変化は見られない。また、(+フィルム) * (+M球) での放電開始電圧は (-フィルム) * (-M球) のそれよりも高い値を示す。

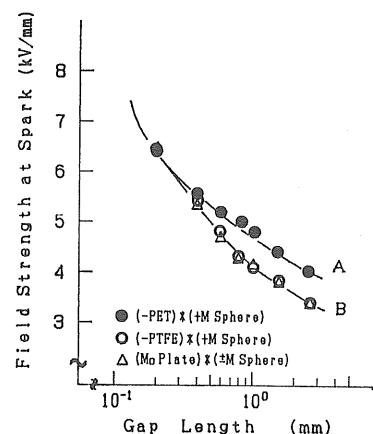


図4 放電電界強度とギャップ長との関係

(帯電フィルムの電圧と球電極の電圧とが反対極性の場合)

帯電電圧: $\pm 1,000$ V

A : (-PET) * (+M Sphere)

(ただし、(-PS) * (+M Sphere) での放電電界もほぼ同じ値を示す。)

B : (-PTFE) * (+M Sphere) 及び (Mo Plate) * (+M Sphere) での放電電界

(ただし、(-PP) * (+M Sphere) 及び (+Film) * (-M Sphere) での放電電界もほぼ同じ値を示す。)

Fig. 4 Relation between electric field strength at spark and gap length.

(In the case where charged film and sphere electrode are the opposite polarities)

Surface potential of charged film: $\pm 1,000$ V

A : Field strength at (-PET) * (+M Sphere),
(Characteristics at (-PS) * (+M Sphere) are almost the same as A)

B : Field strength at (-PTFE) * (+M Sphere) and (Mo Plate) * (+M Sphere),
(Characteristics at (-PP) * (+M Sphere) and (+Film) * (-M Sphere) are almost the same as B)

3.2 (帯電フィルム) * (M球) と (Mo板) * (M球) における放電電界強度の比較

図4、図5に (帯電フィルム) * (M球) の放電開始電圧における電界強度 (E_A) とギャップ長 (d) との関係を示す。フィルムの帯電電圧が $\pm 1,000$ V のときの E_A を代表例として示しているが、実験した帯電電圧の範囲での E_A は図4、図5と同じ傾向を示す。 E_A は、測定された放電開始電圧と図6に示す等価回路とから計算を行った。すなわち、

$$V_A = \frac{C_2 V}{C_1 + C_2} - \frac{Q_0}{C_1 + C_2} \quad (1)$$

$$V_D = \frac{C_2 V}{C_1 + C_2} + \frac{Q_0}{C_1 + C_2} \quad (2)$$

$$Q_0 = C_2 V_0 \quad (3)$$

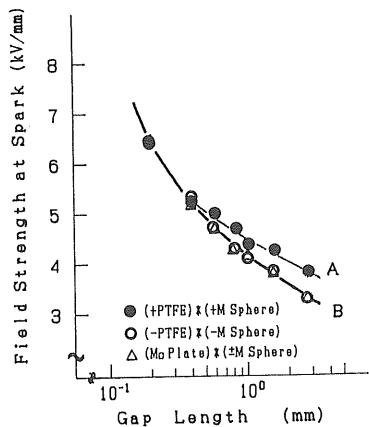


図5 放電電界強度とギャップ長との関係

(帯電フィルムの電圧と球電極の電圧とが同極性の場合)
帯電電圧: ±1,000 V
A: (+PTFE)*(+M球)での放電電界
(ただし、(+フィルム)*(+M球)での放電電界はほぼ同じ値を示す。)
B: (-PTFE)*(-M球)及び(Mo板)*(±M球)での放電電界
(ただし、(-フィルム)*(-M球)での放電電界はほぼ同じ値を示す。)

Fig. 5 Relation between electric field strength at spark and gap length.

(In the case where charged film and sphere electrode are the same polarities)
Surface potential of charged film: ±1,000 V
A: Field strength at (+PTFE)*(+M Sphere),
(Characteristics at (+Film)*(+M Sphere) are almost the same as A)
B: Field strength at (-PTFE)*(-M Sphere) and (Mo Plate)*(±M Sphere),
(Characteristics at (-Film)*(-M Sphere) are almost the same as B)

$$E_A = \frac{V_A}{d} \quad (4)$$

ただし、 V_A : 金属球電極と帶電フィルムとの間の電圧差、 V_D : 帯電フィルムの電圧、 V : 印加電圧、 Q_0 : フィルムの帶電電荷量、 V_0 : 初期帶電電圧、 d : ギャップ長、 C_1 : 金属球電極と帶電フィルム表面との静電容量、 C_2 : 帯電フィルム表面と金属板との静電容量である。また図4、図5には、接地金属板と高電圧金属球電極との組み合わせ ((Mo板)*(±M球)) での放電電界特性 (E_m : 図中の△) も示してある。

図4は帶電電圧と金属球電極への印加電圧とが反対極性の場合についての電界強度を示したものである。
(-PET)*(+M球)及び(-PS)*(+M球)における E_A (図4のAで示すことができる。) は、ギャップ長 (d) >

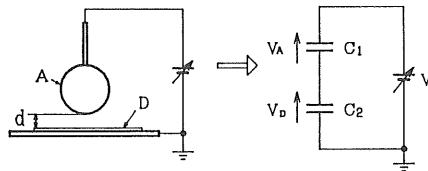


図6 等価回路

A: 金属球電極、D: 帯電フィルム試料、d: ギャップ長、V: 印加電圧、 C_1 : 金属球電極と帶電フィルム表面との静電容量、 C_2 : 帯電フィルム表面と金属板との静電容量、 V_A : 金属球電極と帶電フィルムとの間の電圧差、 V_D : 帯電フィルムの電圧。

Fig. 6 Equivalent circuit.

A: Metal sphere electrode, D: Charged film, d: Gap distance, V: Applied voltage, C_1 : Capacitance between metal sphere electrode and charged film surface, C_2 : Capacitance between charged film surface and metal plate, V_A : Voltage between metal sphere electrode and charged film surface, V_D : Potential of charged film surface.

約0.4 mm の範囲で、(Mo板)*(±M球) での放電電界強度 (E_m) (図4の△) よりも高い値を示す。その他の組み合わせ ((-PTFE)*(+M球)、(-PP)*(+M球) 及び (+フィルム)*(-M球)) における E_A は E_m とほぼ同じ値を示す (図4のBで示すことができる。)。

図5は帶電電圧と金属球電極への印加電圧とが同極性の場合についての電界強度 (E_A) を示したものである。図に示すように、ギャップ長 (d) > 約0.4 mm の範囲で、(+フィルム)*(+M球) での E_A (図5のAで示すことができる。) は E_m (図5の△) よりも高い値を示す。一方、(-フィルム)*(-M球) での E_A は E_m とほぼ同じ値を示す (図5中のBで示すことができる。)。

図4、図5から、ギャップ長 (d) > 約0.4 mmにおいて、(-PET)*(+M球) 及び (-PS)*(+M球) での E_A (図4のA) 及び (+フィルム)*(+M球) での E_A (図5のA) は、金属電極間 ((Mo板)*(±M球)) の放電電界強度 (E_m) (図4、図5の△) よりも高い値を示すことがわかった。しかし、(1)~(4)式をもとに計算で求めた E_A と放電直前における帶電フィルムと金属球電極との間の実質的な電界強度が必ずしも一致するとは限らない。その主な原因として、次の(1)及び(2)のことが考えられる。

- (1) 所定の電圧に帶電させたフィルムを図1(b)の装置にセットしてから放電が発生するまでの間に、フィルム上の帶電電荷の一部がなんらかの原因で (たとえばごく弱い放電で) 中和し、そのことにより見かけ上の放電電界が高い値を示す。
- (2) (-PET)、(-PS) 及び (+フィルム) 上の帶電

電荷分布の不均一性が放電電界に影響を与えている。

しかし以下のそれぞれに示してある理由により、これらの可能性は極めて低い。

- (1) 金属球電極への印加電圧を放電電圧の 95% まで上昇させた後にすぐ遮断し、その時の帶電電圧を測定しても、帶電電圧は初期の値と同じである。したがって、放電の発生直前まで、帶電電荷の中和はないものとみなすことができる。
- (2) 図 3 に示すように、(−フィルム) * (−M 球) の放電開始電圧はフィルム材料によって変化せず、データのはらつきも小さい。このことから、(−PET) 及び (−PS) のみの帶電電荷分布が放電電界に影響を与えるほど不均一となっているとは考えられない。また図 4 に示すように、(+フィルム) * (−M 球) の放電電界強度 (E_A) は金属電極間の E_m とほぼ同じ値であり、かつこれに対応する図 2(a) のデータのはらつきが極めて少ない。このことから、(+フィルム) の帶電電荷分布が放電電界に影響を与えるほど不均一となっているとは考えられない。

以上のことから、(1)～(4)式をもとに計算で求めた E_A は、放電直前における帶電フィルムと金属球電極との間の実質的な電界強度とほぼ等しいとみなすことができる。

3.3 帯電フィルムと高電圧金属電極における放電機構

大気中の平等電界型金属電極における放電機構は、 $P \cdot d < 200 \sim 500 \text{ Torr} \cdot \text{cm}$ の領域でタウンゼント型となるといわれている⁶⁾。ただし、 P は気圧、 d はギャップ長を示す。本実験は $P \cdot d < 190 \text{ Torr} \cdot \text{cm}$ の領域にあるので、金属電極間での放電であれば、タウンゼント型放電が生じることになる。タウンゼント型放電では、電子なだれによる α 作用と、陰極での γ 作用とが重要なファクタとなる。 α 作用自体は、ギャップ間の電界強度が同じであれば、陰極の材質の変化による影響は受けないはずである。一方 γ 作用は、ギャップ間の電界強度が同じであっても、陰極の材質による影響を受ける。これらのこととをもとに、ギャップ長 (d) $> 0.4 \text{ mm}$ における (帯電フィルム) * (M 球) での放電開始特性について以下で検討を行う。

まず、フィルムの帶電電圧と金属球電極への印加電圧とが同極性の場合について考えてみる。(−フィルム) * (−M 球) の場合、フィルムの帶電電圧よりも放電開始電圧の方が高いので、放電時には (−M 球) が陰極となる。 γ 作用は陰極となる (−M 球) で生じる。ギャップ

内の電界は、帶電電圧が同じであればフィルムの材質に関係しない。したがって、この場合の放電電界は、同一ギャップ長の (M₀ 板) * (−M 球) での放電電界 (E_m) と同じ値となり、使用するフィルムの材質の影響を受けないはずである。一方、(+フィルム) * (M 球) の場合、放電時には (+フィルム) が陰極となる。陰極となる (+フィルム) から γ 作用によって電子が放出されるることは考えにくい。したがって、この場合の放電電界は、同一ギャップ長の (M₀ 板) * (+M 球) における放電電界 (E_m) よりも高い値となるであろう。また、(+フィルム) からの電子放出はないので、放電電界は使用する (+フィルム) の材質の影響を受けないはずである。以上のように、フィルムの帶電電圧と金属球電極への印加電圧とが同極性の場合における放電電界特性については、タウンゼント型放電機構をもとに、陰極となる (−M 球) あるいは (+フィルム) での γ 作用を考慮に入れれば説明が可能である。

次に、帶電電圧と金属球電極への印加電圧とが反対極性の場合について考えてみる。(+フィルム) * (−M 球) の場合は、(−M 球) が陰極となり、 γ 作用により (−球) から電子が放出される。したがって、この場合の放電電界は、同一ギャップ長の (M₀ 板) * (−M 球) における放電電界 (E_m) と同じ値となり、使用する (+フィルム) の材質による影響を受けないはずである。一方、(−フィルム) * (+M 球) の場合は (−フィルム) が陰極となる。この場合、(−フィルム) から γ 作用によって電子が放出されるか否かによって、放電電界が異なるてくるものと考えられる。

3.4 (−フィルム) * (+M 球) での放電電界におけるフィルム材料への依存性

図 7 に、ダストフィギュア法によりフィルム上に作られた放電图形を示す。図には代表例として、PTFE と PET の放電图形について示しているが、PP の放電图形は PTFE と、また PS の放電图形は PET とほぼ同様の結果である。(−PTFE) * (+M 球) における图形(図 7(a))では、图形のほぼ中心に正電荷の帶電域(図中の A, (+M 球) からの電荷と考えられる)が存在し、その周りには放射状に細く伸びる負電荷の放電痕跡图形(図中の B)が観測される。また放射状に伸びる負電荷の帶電域の外側には負電荷の帶電(図中の C : 帶電装置により帶電させたもの)が見られる。(−PET) * (+M 球) による图形(図 7(b))では、图形の中心に正電荷の帶電(図中の A')が見られるが、放射状に伸びる放電痕跡は観測されない。一方、(+PTFE) * (−M 球) 及び (+PET) * (−M 球) における图形(それぞれ図 7(c), 図 7(d))では、放電图形のほぼ中心に負電荷の帶電(図中の

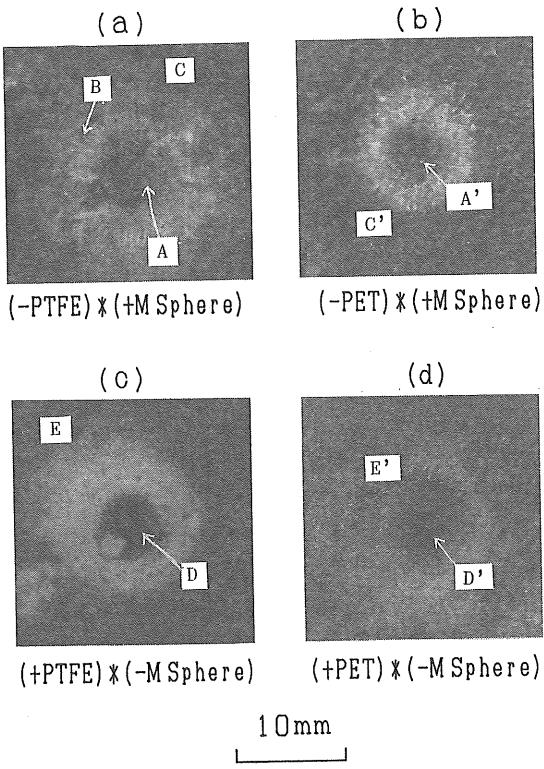


図7 放電図形

A & A': 正電荷の帶電部分 (赤色粉の付着)
 B : 負電荷の帶電部分 (青色粉の付着), (放射状に伸びている)
 C & C' : 負電荷の帶電部分 (青色粉の付着)
 D & D' : 負電荷の帶電部分 (青色粉の付着)
 E & E' : 正電荷の帶電部分 (赤色粉の付着)

Fig. 7 Dust figure.

A & A': Positively charged site, where red powder attaches.
 B : Negatively charged site, where blue powder attaches. (radial pattern)
 C & C' : Negatively charged site, where blue powder attaches.
 D & D' : Negatively charged site, where blue powder attaches.
 E & E' : Positively charged site, where red powder attaches.

D及びD': (-M球)からの電荷と考えられる.)が見られ, その外側には正電荷の帶電域が(図中のE及びE': 帯電装置により帶電させたもの.)が観測される。この2つの図形には, 図7(a)で観測されるような放射状の放電痕跡图形は観測されない。以上のことから, 放電状に細く伸びる負電荷の放電痕跡图形は(-PTFE)*(+M球)の場合(図7(a))にのみ観測される。

(-PTFE)*(+M球)での放電图形に観測される負電荷の放射状の放電痕跡(図7(a)のB)は, 放電時にフ

ィルム表面で電子の運動に基づくストリーマ状の沿面放電が発生していることを示唆している⁷⁾。同じ(-フィルム)であっても, (-PET)*(+M球)ではこのような放電痕跡は観測されない。現在のところ, 放電開始時に(-フィルム)からγ作用によって電子が放出されるか否かを明確に示すことはできない。しかし, (-PTFE)*(+M球)及び(-PP)*(+M球)において, 放電時にフィルム表面で電子の運動に基づく沿面放電が発生していることを示唆している点, 及びこれらの放電電界が(M₀板)*(+M球)における放電電界(E_m)とほぼ等しい点から考えると, 放電開始時にもフィルム表面からγ作用によって電子が放出され, それが放電開始過程に寄与している可能性が高い。一方, (-PET)*(+M球)及び(-PS)*(+M球)においては, 放射状に細く伸びる負電荷の放電痕跡图形が観測されない点, 及びこれらの放電電界が E_m よりも高い点を考えると, 放電開始時において(-フィルム)からγ作用による電子の放出は少ないものと考えられる。

(-フィルム)*(+M球)での放電開始過程に(-PTFE)表面及び(-PP)表面から電子が放出されているとすれば, これらのフィルム表面には電子がトラップされているものと考えられる。一方(-PS)表面及び(-PET)表面上では, (-PTFE)表面や(-PP)表面と比べてトラップされている電子が少ないか, あるいは電子がトラップされていてもそれが放電過程に影響を与えていないことになる。PTFE等のテフロン系のフィルムでは, その表面層に1.0 eV~1.2 eV程度のエネルギーレベルをもつ電子のトラップサイトが存在することが, TSCなどによる実験から明らかになっている^{8,9)}。本実験で使用したPTFE以外のフィルムの表面層における電子のトラップレベルについては, 最近の報告例は少なく, どの程度の値を有するのかは明確ではない。しかし一般的には, PET, PSよりもPTFE, PPの方が負に帯電しやすい傾向があることから^{10,11)}, PETやPSよりもPTFEやPPの方がフィルム表面に電子をトラップさせやすい材料であると推測される。

4. まとめ

コロナ放電によって帶電させた高分子フィルムと直流高電圧金属球電極との間の微小間隙(ギャップ長: 0.2 mm~2.5 mm)における放電開始電圧について検討した。実験は大気中で行われた。帶電電圧は最大±1,750 Vである。以下に得られた結果を番号順に示し, まとめる。

- (1) フィルムの帶電電圧と金属球電極への印加電圧とが反対極性の場合

(1-a) (−フィルム) * (+M球) の放電開始電圧は、ギャップ長 (d) > 0.4 mmにおいて、使用するフィルムの材質に依存する。

(−PET) * (+M球) 及び (−PS) * (M球) における放電開始電界は (−PTFE) * (+M球) 及び (−PP) * (+M球) よりも高い。 (−PTFE) * (+M球) 及び (−PP) * (+M球) の放電開始電界は、同一ギャップ長における (M₀板) * (+M球) での放電電界とほぼ等しい。

(1-b) (+フィルム) * (−M球) の放電開始電圧は使用する高分子絶縁フィルムの材質への依存性ではなく、その放電電界は、同一ギャップ長における (M₀板) * (−M球) での放電電界とほぼ等しい。

(2) フィルムの帯電電圧と金属球電極への印加電圧とが同極性の場合

(−フィルム) * (−M球) と (+フィルム) * (+M球) における放電開始電圧には使用する材料の依存性が見られない。ただし、ギャップ長 (d) > 0.4 mm における放電開始電圧自体は前者の場合より後者の場合の方が高い。後者の放電電界は、同一ギャップ長における (M₀板) * (+M球) での放電電界とほぼ等しい。

(3) (1-b) 及び(2)で示した (+フィルム) * (−M球), (−フィルム) * (−M球) 及び (+フィルム) * (+M球) の放電開始電圧特性は、タウンゼント型放電機構をもとに、(−M球) あるいは陰極となる (+フィルム) での γ 作用を考慮に入れれば説明が可能である。

(4) (1-a) で示した (−フィルム) * (M球) における放電開始電圧のフィルム材質への依存性は、 γ 作用により電子が (−フィルム) 表面から放出されるか否かに起因するものと考えられる。すなわち、放電発生後のフィ

ルム表面の電荷分布をダストフィギュア法を用いて観測を行ったところ、(−PTFE) * (+M球) 及び (−PP) * (+M球) におけるフィルム上には、電子の移動が関与したと考えられる放電痕跡が観測される。 (−PET) * (+M球) 及び (−PS) * (+M球) におけるフィルム上にはこのような放電痕跡は観測されない。このことから、放電開始過程においても、(−PTFE) と (−PP) の表面から γ 作用により電子が放出されているものと考えられる。一方、(−PET) と (−PS) の表面からは、このような電子の放出は少ないものと考えられる。

最後に試料に使用したフィルムを提供していただいた㈱帝人及び三菱樹脂㈱に感謝いたします。

参考文献

- 1) 例えば、L.A. Dissado and J.C. Fothergill : *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*, p. 65, IEE (Peter Peregrinus) (1991)
- 2) 例えば、川村雄克：静電気学会誌, 13 (1989) 31
- 3) 例えば、T.J. Gallagher and A.J. Pearmain : *High Voltage*, p. 49, John Wiley & Sons, New York (1984)
- 4) 例えば、T. Oda and Y. Ito : IEEE Trans. IA., 26 (1990) 656
- 5) H.H. Hull : J. Appl. Phys., 20 (1949) 169
- 6) 大重力、原 雅則：高電圧現象、森北出版 (1973)
- 7) Y. Murooka and S. Koyama : J. Appl. Phys., 44, (1973) 1576
- 8) Xia Zhongfu : IEEE Trans. EI., 26 (1991) 1104
- 9) H. von Seggern : J. Appl. Phys., 50 (1979) 2817
- 10) 静電気学会編：静電気ハンドブック, p. 59, オーム社 (1981)
- 11) V.E. Shashoua : J. Polym. Sci., A1 (1963) 169