

## 論 文

## 帯電した色素処理フィルムと高電圧金属電極との間の放電

近松 洋 安\*, 山野 芳 昭\*

(1994年9月19日受理)

Sparks between a Spherical Metal Electrode and Electrified  
Film Treated with Dye

Hiroyasu CHIKAMATU\* and Yoshiaki YAMANO\*

(Received September 19, 1994)

The spark was produced in an air gap between the spherical metal electrode and corona-charged organic film surface treated with dye. DC or impulse high voltage was applied to the metal electrode. In most cases, the polarity of the metal electrode was positive and the film was negatively corona-charged. The maximum surface voltage of the charged film was -1.75 kV. The films PTFE, PP, PS and PET were used. The kinds of dye used were methylene blue (MB), *p*-aminoazobenzene (PAB), and *p*-nitrobenzene-azoresorcin (PNB). The gap length was in the range 0.2 to 2.5 mm. In the case of negatively charged PTFE and PP films treated with PNB or MB, dc spark voltages are higher than those for the films without the dye treatment. For negatively charged PS and PET, the dc spark voltages almost unchanged by the treatment. The increase in spark strength for the negatively PTFE and PP due to the dye treatment was also observed under the impulse voltage application. For the negatively charged films treated with PAB, the increase in the spark voltages were not observed. Time lags at an impulse spark suggested that number of electrons trapped on PTFE and PP films without dye treatment were more than that on the films treated with PNB or MB.

## 1. はじめに

高電圧を使用する電気・電子機器では、高電圧導体と絶縁物との間に微小間隙が形成されることがある。電気・電子機器自体の小型化が進むに伴い、高電圧絶縁部の縮小化が図られ、結果として微小間隙では部分放電が発生しやすい状況となる<sup>1)</sup>。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部分放電は、絶縁物の劣化やノイズ発生等の原因となり、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る可能性を持っている<sup>1,2)</sup>。このような箇所で発生する部分放電の開始電圧を予測したり、開始電圧自体を上昇させることは、機器の信頼性を高めるうえで重要であろう。

このような背景から、筆者らは、帯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特性について検討を行ってきた<sup>3,4)</sup>。その結果、負帯電フィルムと正極性直流高電圧金属電極との間の放電電圧は、使

用するフィルムの材質に依存することがわかった。この依存性は、放電開始の過程において、負帯電フィルムからの電子放出特性に起因するものと考えられた。すなわち、帯電電圧が同じ負帯電フィルムであっても、電子が負イオンより多く帶電しているフィルムでは、負イオンが多くの帶電しているフィルムよりも放電電圧が低くなる。

このことを逆に考えると、なんらかの方法でフィルム表面を改質し、フィルム表面に電子をトラップさせにくくすれば、改質した負帯電フィルムと正極性高電圧金属電極との間の放電電圧は、表面が未改質の帯電フィルムを用いた場合より高くなる可能性がある。微小間隙における放電電圧の上昇は、高電圧絶縁機器や電気・電子機器の信頼性の維持にとって有効な手段の一つであろう。

本研究では、フィルムの表面改質を行うことによって、負帯電フィルムと正極性高電圧金属電極との間の放電電圧を上昇させることを試みた。表面改質の方法としては、フィルム表面に色素を吸着させた。すなわち、フィルム表面にもともと存在する電子トラップに色素中のイオンを吸着させようとするものである。このような色素吸着フィルムに大気中で負コロナ帯電をさせると、負帯電フィルム上には電子ではなく負イオンが多く存在す

キーワード：色素処理、帯電フィルム、小ギャップ放電

\* 千葉大学教育学部 (263 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

Faculty of Education, Chiba University, 1-33  
Yayoichou, Inage-ku, Chiba-shi, 263 Japan

表 1 実験に使用した色素  
Table 1 Dye used in the Experiment.

極 性	種 類	化 學 式	略 号
電子供与性	メチレンブルー <i>p</i> -アミノアゾベンゼン	$(\text{CH}_3)_2\text{NC}_6\text{H}_3\text{NS}^+\text{C}_6\text{H}_4\text{N}(\text{CH}_3)_2\text{Cl}^-$ $^+\text{NH}_2\text{C}_6\text{H}_4\text{N} : \text{NC}_6\text{H}_5$	MB PAB
電子受容性	<i>p</i> -ニトロベンゼンアゾレゾルシン	$-\text{O}_2\text{NC}_6\text{H}_4\text{N} : \text{NC}_6\text{H}_3(\text{OH})_2$	PNB

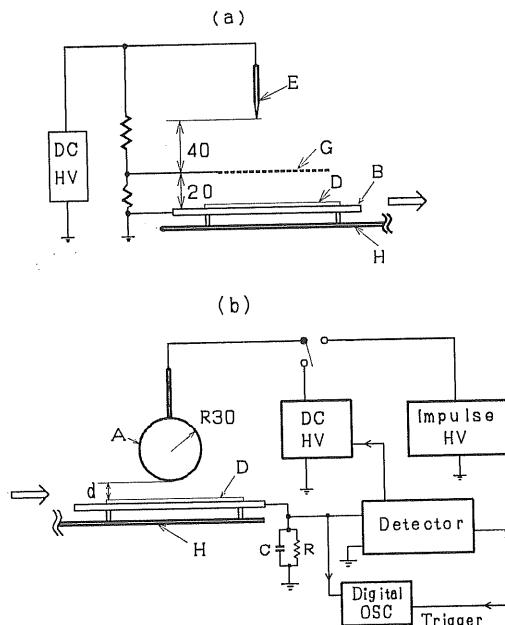


図 1 実験装置

(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, 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, All dimensions are in mm.

ることになるはずである。その結果、負帯電フィルムと正極性直流高電圧金属電極との間の放電開始電圧が上昇することが期待できる。

## 2. 実験方法

### 2.1 試料フィルムおよびフィルムの色素処理方法

使用した高分子フィルムは、ポリエチレン(PET, 50

μm 厚, (株)帝人製 FLL), ポリスチレン(PS: 60 μm 厚, 三菱化成(株)製 DXL164), ポリプロピレン(PP: 30 μm 厚, (株)帝人製パンライト AA) およびテフロン(PTFE: 50 μm 厚, ニチアス(株)製 No. 9007) である。これらは前報<sup>3)</sup>と同じものを使用している。実験では、フィルムを 10×10 cm の大きさに切って用いた。

フィルムに吸着させた色素を表 1 に示す。色素は、電子受容性および電子供与性のものそれぞれ 1 種類、および対イオンを有しているメチレンブルー(色素イオンは電子供与性)の合計 3 種類を用いた。以下では、これらの色素を表 1 に示してある略号で呼ぶこととする。

色素によるフィルムの処理は以下の手順で行った。

(1) フィルムをエタノールで洗浄した後、十分に乾燥させる。(2) 色素を重量比で 0.05% 溶かした水溶液(20°C)に 10 時間フィルムを浸す。(3) 水溶液からフィルムを取り出した後、温度 40°C の乾燥器内で約 24 時間乾燥させる。

### 2.2 実験装置および測定方法

図 1 に実験装置を示す。実験は温度 20~23°C, 相対湿度 40~50% にコントロールされた室内大気中で行った。本研究では、おもに負極性帯電フィルムと正極性高電圧金属球との間の放電について検討を行った。フィルムは前項で述べた方法で色素処理を施したもの用いた。フィルム試料への帯電は図 1(a)の装置で行った。本実験における最大帯電電圧は、-1,750 V である。グリッド電極(図 1(a)の G)の電圧を変化させることによって、帯電電圧の設定を行った。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、帯電電圧を測定した後、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(図 1(b))。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。球電極(図 1(b)中の A)に直流あるいはインパルス(0.6/6 μs)の高電圧を印加して、ギャップ間での放電電圧を測定した。なお、フィルムに帯電させた電荷は、色素処理の有無にかかわらず、帯電させてから 24 時間後でもその 85% 以上が残留していた。

直流放電電圧の測定に際しては、170 V/s の一定上昇

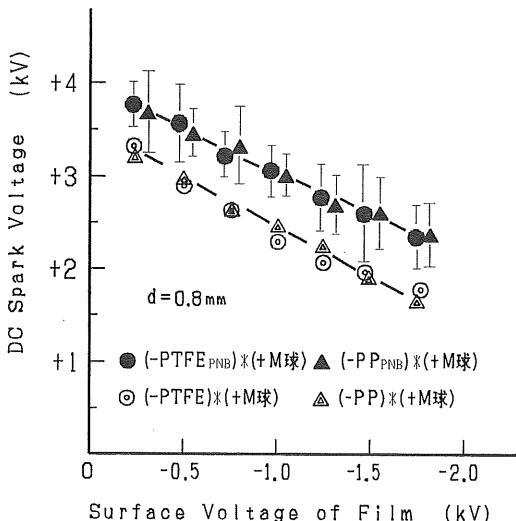


図 2(a) 負帯電フィルムと正極性球電極との組み合わせにおける直流放電電圧と帶電電圧との関係 (PTFE, PP の場合)

ギャップ長 ( $d$ ) = 0.8 mm

A :  $(-\text{PTFE}_{\text{MB}}) * (+\text{M Sphere})$  および  $(-\text{PP}_{\text{MB}}) * (+\text{M Sphere})$   
B :  $(-\text{PTFE}) * (+\text{M Sphere})$  および  $(-\text{PP}) * (+\text{M Sphere})$  の関係

Fig. 2(a) Relation between dc spark voltage and surface potential of charged film, in the case of negatively charged film and positively sphere electrode. (Films are PTFE and PP.)

Gap distance ( $d$ ) = 0.8 mm

A :  $(-\text{PTFE}_{\text{MB}}) * (+\text{M Sphere})$  and  $(-\text{PP}_{\text{MB}}) * (+\text{M Sphere})$ , B :  $(-\text{PTFE}) * (+\text{M Sphere})$  and  $(-\text{PP}) * (+\text{M Sphere})$

速度で印加電圧を上昇させた。ギャップに  $\pm 0.5 \text{ pC}$  以上の放電電荷をもつ放電が発生すると、印加電圧の上昇は自動停止する。その時の印加電圧の値を放電電圧とした。測定は同一条件において 20 回行い、それらの平均値をデータとした。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。

インパルス ( $0.6/6 \mu\text{s}$ ) 課電による放電電圧 (50% 放電電圧) の測定は補間法で行った。同一条件 (電極間隔、帶電電圧、印加電圧が同一条件) における放電確率の測定は、20 回の電圧印加試行から求めた。また、インパルス破壊時における放電遅れ時間の測定も行った。

以下においては簡単のため、負帯電 PTFE フィルムを  $(-\text{PTFE})$ 、色素処理を行った負帯電フィルムを  $(-\text{FilmDYE})$ 、正極性高電圧金属球電極を  $(+\text{M Sphere})$ 、接地金属板を、 $(\text{ME Board})$  のように標記する。また、 $(-\text{PET}_{\text{PNB}})$  と  $(+\text{M Sphere})$  との組み合わせを  $(-\text{PET}_{\text{PNB}}) * (+\text{M Sphere})$  と標記する。

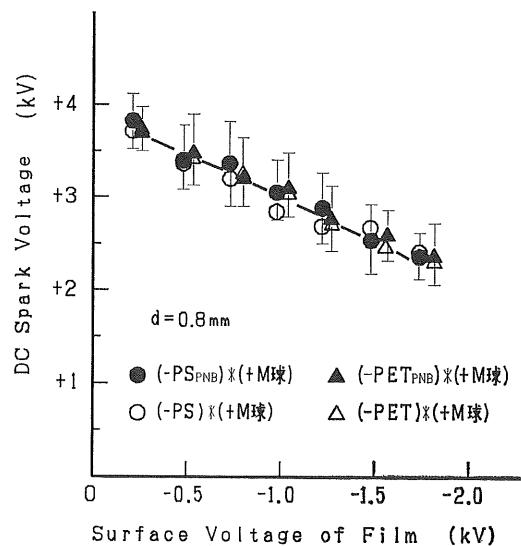


図 2(b) 負帯電フィルムと正極性球電極との組み合わせにおける直流放電電圧と帶電電圧との関係 (PS, PET の場合)

ギャップ長 ( $d$ ) = 0.8 mm

Fig. 2(b) Relation between dc spark voltage and surface potential of charged film, in the case of negatively charged film and positively sphere electrode. (Films are PS and PET.)

Gap distance ( $d$ ) = 0.8 mm

### 3. 実験結果および検討

#### 3.1 色素処理フィルムと高電圧金属球電極の直流放電電圧

図 2(a)および(b)に、フィルムの帶電極性が負の場合、すなわち  $(-\text{Film}) * (+\text{M Sphere})$  および  $(-\text{Film}_{\text{PNB}}) * (+\text{M Sphere})$  における帶電電圧と直流放電電圧との関係を示す。図 2(a)は、PTFE および PP フィルムを使用した場合であり、図 2(b)は、PET および PS の場合である。これらのグラフは、ギャップ長 ( $d$ ) = 0.8 mm における結果を代表例として示している。

図 2(a)に示すように、PTFE および PP フィルムを PNB 色素で処理すると、未処理フィルムと比べて放電電圧が 30% 程度上昇する。未処理フィルムにおける放電電圧のばらつきは  $\pm 50 \text{ V}$  以内であるが、PNB 色素で処理したフィルムでは  $\pm 100 \text{ V} \sim \pm 500 \text{ V}$  程度のばらつきが観測される。

一方 PS および PET フィルムを PNB 色素で処理した場合は、図 2(b)に示すように、PTFE や PP フィルムの場合のような放電電圧の上昇は見られない。

図 3 は、 $(-\text{Film}) * (+\text{M Sphere})$  および  $(-\text{FilmDYE}) * (+\text{M Sphere})$  において、帶電電圧が  $-1,000 \text{ V}$ 、電極間隔

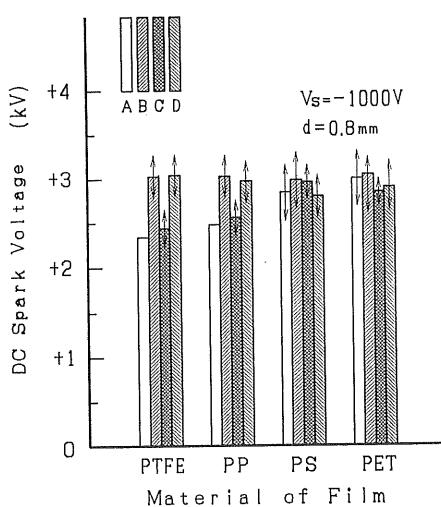


図 3 使用色素と直流放電電圧との関係

A : 未処理フィルム, B : MB 処理フィルム, C : PAB 処理フィルム, D : PNB 処理フィルム。

$V_s$  : 帯電電圧 = -1,000 V,  $d$  : ギャップ長 = 0.8 mm.

Fig. 3 Relation between kind of dye and dc spark voltage.

A : non treated film, B : MB treated film,

C : PAB treated film, D : PNB treated film.

$V_s$  : Surface voltage = -1,000 V,  $d$  : Gap distance = 0.4 mm.

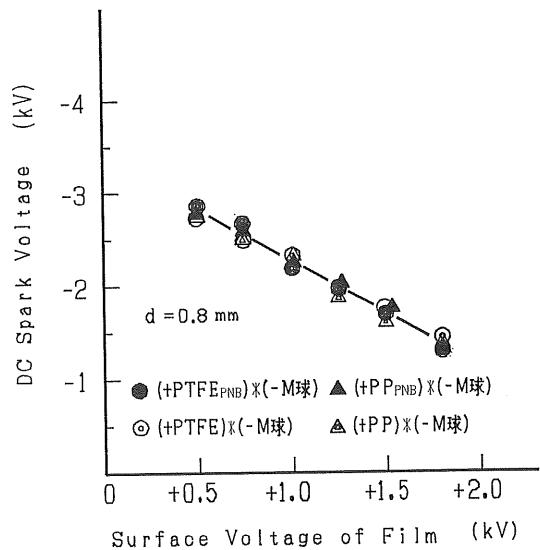
(d) が 0.8 mm の場合における直流放電電圧を、フィルムの材質ごとに比較したものである。PTFE および PP フィルムを、PNB および MB 色素で処理すると放電電圧が上昇するが、PAB 色素で処理したものについては放電電圧の上昇はみられない。また、PS および PET フィルムでは、使用したすべての色素で、色素処理による放電電圧の顕著な上昇は見られない。

図 2 および図 3 では、代表例としてギャップ長 (d) が 0.8 mm の場合を示しているが、実験を行った電極間隔 (d) の範囲では、0.4 mm 以上のギャップ長で上述の特性が観測される。

図 4 はフィルムの帯電極性が正の場合、すなわち (+Film<sub>PNB</sub>) \* (-M 球) および (-Film) \* (+M 球) における放電特性を参考として示したものである。代表例として、PTFE および PP フィルムについて示してある。図に示すように、フィルムの PNB 色素処理による放電電圧の上昇の効果は見られない。実験に使用した他の色素で処理しても、フィルム帯電電圧が正極性の場合には、放電電圧の上昇は観測されなかった。

### 3.2 色素処理フィルム使用による直流放電電圧の上昇について

本実験における気圧およびギャップ長の範囲での放電機構は、前報<sup>3,4)</sup>と同様に、タウンゼント型で説明でき

図 4 正帯電フィルムと負極性球電極との組み合わせにおける直流放電電圧と帯電電圧との関係  
ギャップ長 (d) = 0.8 mmFig. 4 Relation between dc spark voltage and surface potential of charged film, in the case of positively charged film and negatively sphere electrode.  
Gap distance (d) = 0.8 mm

るものと考えられる。前報で示したように、未処理状態の (-Film) \* (+M 球) において、PS および PET フィルムでの直流放電電圧は、PTFE, PP と比較して高い値を示す。このことは、本実験結果(図 2, 図 3)からもわかる。このような (-Film) \* (+M 球) における放電電圧のフィルム材料依存性については、前報では、陰極となる (-Film) からの  $\gamma$  作用にもとづく電子放出の程度に関係しているものと考えた<sup>3,4)</sup>。つまり、一般に (-Film) に帶電する電荷は電子と負イオンとが考えられるが、同じ帶電電位であっても負イオンより電子が多い割合で帶電している (-Film) を用いた場合の放電電圧は、 $\gamma$  作用の影響を考えると、電子より負イオンが多く帶電している (-Film) の場合よりも低くなるはずである。この議論をもとに、本実験で得られた (-Film<sub>DYE</sub>) \* (+M 球) における放電特性について、以下で検討を行うこととする。

PNB および MB 色素で処理を行った (-PTFE<sub>DYE</sub>) \* (+M 球) および (-PP<sub>DYE</sub>) \* (+M 球) の直流放電電圧は、図 2, 図 3 で示したように、未処理フィルムを使用した場合と比較して高い値を示している。この場合、(-Film<sub>DYE</sub>) が陰極となるので、放電電圧は  $\gamma$  作用による (-Film<sub>DYE</sub>) からの電子放出特性の影響を受けていることが考えられる。

電子受容性の色素である PNB を含んだ水溶液には、負極性の色素イオンが存在している。フィルムを水溶液に浸すと、フィルム表面の電子トラップに色素イオンが引き寄せられるものと考えられる。その結果、色素水溶液から取り出して乾燥させたフィルム表面の電子トラップには、負の色素イオンが存在することになる。このような処理を施したフィルムを負コロナ放電により帯電させても、その表面は電子がトラップされにくい状態となっているであろう。すなわち、帯電電圧が同じ値の負帯電フィルムであっても、色素処理を行った負帯電フィルムでは、負帯電電荷中にしめる電子の割合が、未処理フィルムと比べて、少ないものと考えられる。したがって、放電成立過程で負帯電フィルムから  $\gamma$  作用によって放出される電子の数は、 $(-PTFE)$  や  $(-PP)$  に比べて、 $(-PTFE_{PNB})$  や  $(-PP_{PNB})$  の方が少ないものと考えられる。そのことが原因となって、 $(-PTFE_{PNB}) \ast (+M\text{球})$  および  $(-PP_{PNB}) \ast (+M\text{球})$  における直流放電電圧が上昇するものと考えられる。

MB 色素は、正極性色素イオンおよび負極性対イオン ( $Cl^-$ ) とから構成され、水溶液中ではこれら 2 つのイオンが電離している。フィルムを水溶液に浸すと、フィルム表面の電子トラップには負極性対イオンが引き寄せられるであろう。その結果、水溶液から取り出して乾燥させたフィルム表面の電子トラップには、負の対イオンが存在することになる。このような処理を施したフィルムを負コロナ放電により帯電させても、その表面に電子がトラップされにくい状態となっているであろう。そのため、MB で処理した場合も、PNB 色素で処理した場合と同様に、直流放電電圧が上昇するものと考えられる。

電子供与性の色素である PAB を含んだ水溶液中では、正極性の色素イオンが存在している。フィルムを水溶液中に浸しても、フィルム表面の電子トラップに色素イオンはトラップされにくうことになる。したがって、色素水溶液から取り出して乾燥させたフィルムを、負コロナ放電により帯電させると、電子トラップに電子がトラップされることになるとを考えられる。したがって、PAB 色素でフィルムを処理しても、直流放電電圧は上昇しないことになる。

一方、 $(-PS) \ast (+M\text{球})$  や  $(-PET) \ast (+M\text{球})$  のように色素処理なしの状態で高い直流放電電圧を示すものは、もともとフィルム表面の電子トラップが少なく、そのためフィルムに色素を付着させた  $(-Film_{DYE}) \ast (+M\text{球})$  であっても、放電電圧のさらなる上昇の効果は少ないものと考えられる。

それらに対して、 $(+Film_{DYE}) \ast (-M\text{球})$  の直流放電

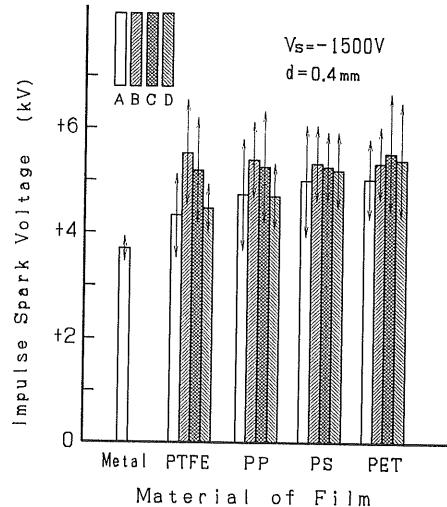


図 5 使用色素とインパルス放電電圧との関係  
A: 未処理フィルム, B: MB 処理フィルム, C: PAB 処理フィルム, D: PNB 処理フィルム  
 $V_s$ : 帯電電圧 =  $-1,500$  V,  $d$ : ギャップ長 =  $0.4$  mm

Fig. 5 Relation between kind of dye and impulse spark voltage.  
A: non treated film, B: MB treated film, C: PAB treated film, D: PNB treated film.  
 $V_s$ : Surface voltage =  $-1,500$  V,  $d$ : Gap distance =  $0.4$  m.

電圧は、図 4 に示したように、 $(+Film) \ast (-M\text{球})$  とほぼ等しい。この場合は金属球電極が陰極となるので、 $\gamma$  作用による電子放出は金属球電極で生じる。したがって放電電圧は、フィルム表面の色素の有無には影響を受けないことになる。

フィルム表面に帶電している電子密度 ( $N_e$ ) と負電荷密度 ( $N_c$ ) の比 (すなわち  $(N_e/N_c)$ ) がフィルムの色素処理により差異が生じていることをより明確にするため、直流課電時と同一のフィルムおよび電極を用いて、インパルス課電における放電電圧と破壊時の遅れ時間を測定した。インパルス課電の場合は、直流課電に比べて電圧印加時間が極端に短いので、陰極からの初期電子放出特性が放電電圧や遅れ時間に大きく影響を与えるであろう。

### 3.3 インパルス放電電圧とインパルス破壊時の遅れ時間

図 5 に、 $(-Film) \ast (+M\text{球})$  および  $(-Film_{DYE}) \ast (+M\text{球})$  におけるインパルス放電電圧を示す。同図は代表例として、電極間隔 ( $d$ ) =  $0.4$  mm, 帯電電圧 =  $-1,500$  V の場合について示してある。また、帯電フィルムを接地した金属平板に取り替えた構成、すなわち ( $Me$  板)  $\ast (+M\text{球})$  におけるインパルス放電電圧 (図中の

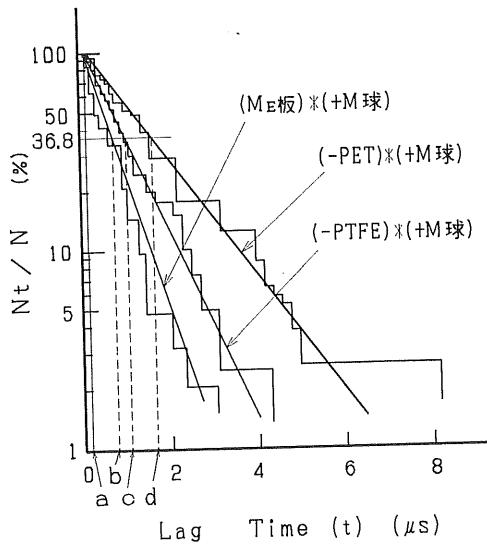


図 6(a) インパルス破壊における放電遅れ時間のラウエプロット (未処理フィルムの場合)  
 $N_t$ : 放電発生数,  $N$ : 放電全発生数 (=75) 帯電電圧=−1,500 V, 印加電圧: +5.5 kV,  
ギャップ長 ( $d$ ) = 0.4 mm.

Fig. 6(a) Laue-Plot with time lag at impulse breakdown.  
(in the case of non-coated film)  
 $N_t$  is number of times in which the time lag exceeds  $t$  in total number  $N$  of trials  
( $N=75$ ).  
Surface voltage=−1,500 V, Applied voltage=+5.5 kV, Gap distance=0.4 mm.

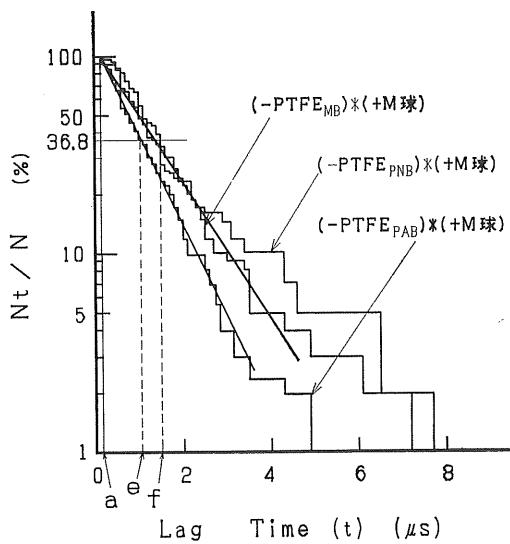


図 6(b) インパルス破壊における放電遅れ時間のラウエプロット (色素処理したフィルムの場合)  
 $N_t$ : 放電発生数,  $N$ : 放電全発生数 (=75) 帯電電圧=−1,500 V, 印加電圧: +5.5 kV,  
ギャップ長 ( $d$ ) = 0.4 mm.

Fig. 6(b) Laue-Plot with time lag at impulse breakdown.  
(in the case of dye treated film)  
 $N_t$  is number of times in which the time lag exceeds  $t$  in total number  $N$  of trials  
( $N=75$ ). Surface voltage=−1,500 V, Applied voltage=+5.5 kV, Gap distance=0.4 mm.

Metal と表示してある放電電圧) も参考として示した。図に示すように、PNB および MB 色素で処理を行った  $(-PTFEDYE)*(+M\text{球})$  および  $(-PPDYE)*(+M\text{球})$  におけるインパルス放電電圧は、未処理フィルムを使用したときよりも高い値を示す。 $(-PSDYE)*(+M\text{球})$  および  $(-PETDYE)*(+M\text{球})$  では、色素処理による放電電圧の上昇傾向は顕著には観測されない。なお、フィルムが正帯電の場合、すなわち  $(+Film)*(-M\text{球})$  および  $(+FilmdYE)*(-M\text{球})$  におけるインパルス放電電圧は、フィルム材質および使用する色素への依存性は見られなかった。

図 6(a) および図 6(b) はインパルス放電時における遅れ時間のラウエプロットである。図 6(a) は  $(-PTFE)*(+M\text{球})$ ,  $(-PET)*(+M\text{球})$  および  $(ME\text{板})*(+M\text{球})$  における遅れ時間を、図 6(b) は  $(-PTFEDYE)*(+M\text{球})$  における遅れ時間を代表例として示している。これらの遅れ時間を測定する際に印加した電圧値は、{(印加電圧値) − (帯電電圧)} = 7 kV とした。

統計的遅れ時間 ( $\tau_s$ ) は、使用フィルムの種類および色素付着の有無に依存している。図 6(a) に示すように、

$(-PTFE)*(+M\text{球})$  における  $\tau_s$  (図中  $(c-a)$  に相当する時間) は、 $(-PET)*(+M\text{球})$  における  $\tau_s$  (図中  $(d-a)$  に相当する時間) よりも短い。しかし、PNB および MB 色素で処理を行った PTFE を用いた場合の  $\tau_s$  (図 6(b) 中の  $(f-a)$ ) は、未処理 PTFE を用いた場合 (図 6(a) の  $(c-a)$ ) よりも長くなっている。PAB 色素で処理した場合の  $\tau_s$  (図 6(b) 中の  $(e-a)$ ) は、PNB および MB 色素で処理を行った場合より短い。

一方、形成遅れ時間 (図 6(a), 図 6(b) 中の  $a$  に相当する時間) に関しては、実験の範囲において、使用するフィルムおよび色素の種類にかかわらず、約 0.2  $\mu\text{s}$  と変化がなかった。

統計的遅れ時間 ( $\tau_s$ ) は、インパルス電圧印加開始から放電に必要な電子がギャップ間で適当な配置につくまでの時間に相当している<sup>5)</sup>。したがって、 $\tau_s$  が長いものほど、初期電子がギャップ間に現れにくいことを示唆していることになる。表 2 は、測定した遅れ時間のラウエプロットから  $\tau_s$  のみについて整理したものである。表中の PTFE フィルムの場合、PNB 色素で処理すると、未処理よりも  $\tau_s$  が長くなっている。このことは、帯電

表 2 統計的遅れ時間のフィルム材料への依存性  
帶電電圧: -1,500 V, 印加電圧: +5.5 kV, ギャップ長: 0.4 mm.

Table 2 Dependence of statistical time lag on film material.  
Surface voltage = -1,500 V, Applied voltage = +5.5 kV, Gap distance = 0.4 mm.

フィルム 材質	統計的遅れ時間 ( $\tau_s$ )	
	(-Film)*(+M 球)	(-Film <sub>PNB</sub> )*(+M 球)
PTFE	1.0 $\mu$ s	1.5 $\mu$ s
PP	1.2 $\mu$ s	1.5 $\mu$ s
PS	1.6 $\mu$ s	1.6 $\mu$ s
PET	1.7 $\mu$ s	1.6 $\mu$ s

圧が同じであっても、(-PTFE)\*(+M 球) より (-PTFE<sub>PNB</sub>)\*(+M 球) の方が、インパルス課電時における初期電子がギャップ間に現れにくいくことを示している。PP フィルムにおいても、PTFE フィルムの場合ほど顕著ではないが、やはり PNB 色素処理フィルムを使用した場合の方が  $\tau_s$  が長くなる傾向にある。他のフィルム(PS, PET)の場合は、色素を付着させても  $\tau_s$  はほとんど変化しない。表には、PNB 色素の場合のみ示しているが、MB 色素で処理したときの  $\tau_s$  も PNB 色素の場合と同様の傾向を示す。

表 2 の  $\tau_s$  は、印加電界が同じ条件(近似的に、一定ギャップ長において(印加電圧-フィルム電圧)が等しい値)において測定したものである。この条件下では、放電に寄与する初期電子がギャップ間に現れるまでの時間は、放電成立の過程において陰極となる負帯電フィルムから放出される電子の数と関係しているものと考えられる。これは、(-PTFE) や (-PP) の表面では、同じ帶電電圧の (-PTFE<sub>PNB</sub>) や (-PP<sub>PNB</sub>) の表面よりも、電子密度 ( $N_e$ ) と負電荷密度 ( $N_c$ ) との比(すなわち  $(N_e/N_c)$ ) の値が大きいことと関係しているものと考えられる。直流課電における放電過程では、このことが  $\gamma$  作用に影響を及ぼし、インパルス課電の場合には、初期電子の放出作用に影響を及ぼしているものと考えられる。

#### 4. まとめ

色素で処理を行った高分子フィルムを用いて、主に負帯電フィルムと正極性高電圧金属球とが作る微小間隙で生じる放電について検討を行った。以下にこの結果を番号順に整理し、まとめとする。

1) PTFE および PP フィルムに色素処理を行った場合、PNB および MB 色素については、直流およびインパルス放電電圧の上昇が観測された。

2) PS および PET フィルムの場合、使用した色素すべてについて、色素処理による放電電圧の顕著な上昇は観測されない。

3) インパルス破壊時の統計的遅れ時間は、色素処理を施していない状態では  $\text{PTFE} \leq \text{PP} < \text{PS} \leq \text{PET}$  の順に長くなる。

PTFE と PP フィルムに PNB および MB 色素で処理を行うと、統計的遅れ時間は長くなる。一方、PS および PET フィルムに色素処理を施しても、統計的遅れ時間は、色素処理を行わない状態とほぼ同じである。

なお、形成遅れ時間は、色素処理の有無にかかわらず、フィルム材料への依存性は観測されない。

4) PTFE, PP において、負帯電フィルムと正極性金属電極との組み合わせにおける放電電圧がフィルム表面の色素処理によって上昇する原因是、色素に含まれる負イオンがフィルムの電子トラップに付着する結果、フィルム表面に電子が帯電しにくくなることによるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 例えば、L.A. Dissado and J.C. Fothergill: *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*, IEE, p. 65, Peter Peregrinus, London, U.K. (1991)
- 2) 例えば、川村雄克: 静電気学会誌, 13 (1989) 31
- 3) 山野芳昭: 静電気学会誌, 17 (1993) 130
- 4) Y. Yamano: IEEE Trans. on DEI, 1 (1994) 503
- 5) J.M. Meek and J.D. Craggs: *Electrical Breakdown of Gases*, p. 656, John Wiley & Sons, New York (1978)