

## 小論文

# PMMA 絶縁フィルム表面における交流部分放電の 添加剤による低減効果

山野芳昭\*, 福地康範\*

(1996年2月23日受理)

## Decrease in ac Partial Discharges on PMMA Insulating Film by Use of Additive

Yoshiaki YAMANO\* and Yasunori FUKUCHI\*

(Received February 23, 1996)

The purpose of this study is to decrease acPD at a triple junction on a PMMA film by use of additive. An electrode configuration used was a sphere-plane system. The film of 100  $\mu\text{m}$  thick with the additive was prepared by the solution-grown casting method. Five kinds of additives were used; *p*-aminoazobenzene (Ab), *p*-nitrobenzeneazoresorcinol (Nb), methylene blue (Mb), methyl red (Mr), and magenta (Mg). In the cases of the films with Ab, Mb and Mg, an integrated magnitude and number of PD pulses with 100 cycles of applied voltage were reduced to about 40% of those in the case of the film without the additive. The reduction in PD by additives was observed in a range of applied voltage from 1.4 kV to 3.0 kV. In the cases of the films with the other additives, the decrease in PD was not observed. The surface charge decay rate on the film at one minute after an initial charging depended on its polarity and the additives. For the films added with Ab, Mb and Mg, positive charge decays were faster than the film without the additive. It was found that these three additives were corresponding to the ones which were effective in decreasing PD. For the negative charge decay, the corresponding was not observed.

### 1. まえがき

高電圧機器のトリプルジャンクション部（高電圧導体-絶縁物表面-気体が接触する箇所、以下 TJ と略す）では、交流部分放電が発生しやすい。TJ で発生する交流部分放電の抑制に関しては、電極や絶縁物の形状を工夫したり、半導電層を設けるなどにより、TJ 近傍の電界の低減を図る例が見られる<sup>1,2)</sup>。しかし、使用する絶縁材料に添加剤を加えることによって、TJ で発生する交流部分放電を低減させようとする試みはあまり見られない。

筆者らは以前に、添加剤を加えた PMMA（アクリル樹脂）フィルム（厚さ 100  $\mu\text{m}$ ）を絶縁板（厚さ 3 mm の PMMA）の表面に配置した 2 層構造の試料を用いると、部分放電の低減が可能であることを示した<sup>3)</sup>。2 層構造の試料を使用した理由は、厚い絶縁物表面に添加剤

の入った薄い絶縁フィルムが存在する状態では、絶縁物全体としての誘電特性がフィルムの有無によってほとんど影響を受けないと考えたからである。

しかし、添加剤によるフィルムの誘電率や誘電正接等の変化がきわめて少なければ、絶縁物としてフィルム単体での使用も可能となるであろう。小型・軽量化が要求される電子機器において、高電圧導体を IC や LSI で構成される回路の近傍に配置せざるをえないような場合、部分放電の低減効果を持つ薄い絶縁フィルムの使用は、電子機器の信頼性を維持するための手段の一つとして使用できるであろう。また実際に作製した添加剤入りフィルムの誘電特性を測定した結果、誘電率および誘電正接は無添加のものとほとんど変化がないことがわかった。

このようなことから、本論文では、添加剤を加えた一枚のフィルム試料を絶縁物として使用した場合における部分放電の低減効果に及ぼす添加剤の効果について、その実験結果を報告する。

キーワード：部分放電、絶縁フィルム、添加剤

\* 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, Yayoicho, Inage-ku, Chiba, 263 Japan

## 2. 実験方法

### 2.1 フィルムの作製

溶液キャスティング法で、厚さ 100  $\mu\text{m}$ 、直径 60 mm の円形アクリル (PMMA) フィルムを作製した。溶剤は 1-2 ジクロロエタンである。添加剤として、表 1 に示す 5 種類のものを用いた。添加剤の濃度は PMMA に対して 0.05 wt% である。以後、添加剤の種類は表 1 にある略称で示す。作製した添加剤入りフィルムの比誘電率 ( $\epsilon_r$ ) および誘電正接 ( $\tan \delta$ ) は、印加電界の周波数が 30 Hz～100 kHz の間で、添加剤の種類および有無による差異は見られなかった。1 kHz でのこれらの値は、 $\epsilon_r=3.05$ ,  $\tan \delta=8.32 \times 10^{-1}$  であった。また、体積・表面抵抗率の添加剤による低下は、実験環境下で 1 桁以内であった。無添加フィルム（以下、Nm フィルムと略記）も含めてそれらの値は、 $1 \times 10^4 \text{ V/cm}$  印加時 (DC) の収束値でそれぞれ  $6.6 \times 10^{-13} \sim 9.0 \times 10^{-12} \Omega \cdot \text{cm}$  および  $2.3 \times 10^{-12} \sim 8.5 \times 10^{-11} \Omega$  の範囲内であった。

表 1 に示した添加剤のうち、Ab は 2 層構造試料において部分放電の低減効果を示したものであり、Nb は低減効果を示さなかったものである<sup>3)</sup>。そこでは、Ab が低減効果を示す理由として、電子供与基を有していることに関係するものと考えられた。そこで今回は新たに Mg, Mb, Mr についても検討を行った。Mr は電子供与基、Mb は負極性対イオンが存在し、Mg ではそれら両方を有している。

以後本論文では、たとえば Mg を添加したフィルムを Mg フィルムと略記する。

### 2.2 部分放電特性の測定

部分放電の測定装置の概要を図 1 に示す。試料 (F : 添加剤の入ったフィルム 1 枚) は球電極 (S : 直径 30 mm) と接地平板電極 (C) の間に配置してある。接地平板電極と接触するフィルム面はアルミ蒸着を施してある。球電極に交流 (50 Hz) 1.4～3.0 kV を印加し、フィルム表面に部分放電を発生させる（部分放電の発生電圧は約 1.2 kV であった）。電圧を印加してから 3 分後に測定を開始した。図中のインピーダンス Z で検出された部分放電電流は AMP (周波数帯域 100 Hz～2 MHz, 20 dB) を通して、パルス性電流のみが増幅され、デジタルストレージオシロスコープ (OSC) へ導かれる。OSC には、30 s ごとに交流印加電圧 1 cycle 分の部分放電電流信号を取り込んだ。取り込んだ信号はデジタル化されてパーソナルコンピュータへ送られる。

実際の測定では、1 種類のフィルム試料につき合計で交流印加電圧の 300 cycles 分のパルス信号の取り込みを行った。データ整理の結果、100 cycles 分の信号をデータ

表 1 使用した添加剤  
Table 1 Kind of additives used.

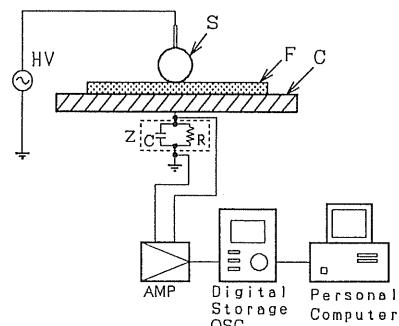
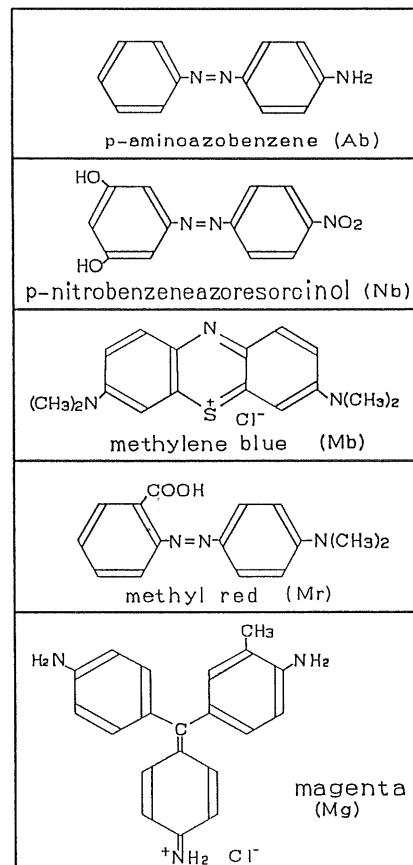


図 1 実験装置の概略および試料の配置

S : 高電圧球電極 (直径 30 mm, 鉄), C : 接地平板電極, F : フィルム試料 (厚さ 100  $\mu\text{m}$ , 直径 60 mm), Z : 検出インピーダンス ( $R=200 \Omega$ ,  $C=100 \text{ pF}$ ), AMP : 増幅器 (20 dB, 100 Hz～2 MHz).

Fig. 1 Experimental block diagram and specimen.

として取り扱っても、再現性等に問題がないことがわかったので、本論文ではすべて 100 cycles 分のデータとともに実験結果の提示を行うこととした。なお、使用し

た增幅器のダイナミックレンジ（約2.5桁）の関係から、本論文では見かけの放電電荷の絶対値が $1 \times 10^{-11} \text{ C}$ 以上のものについて取り扱った。

実験は、温度20~23°C、湿度50~55%に調節された室内で行った。

### 3. 実験結果と検討

#### 3.1 部分放電パルスの検出結果

図2は、代表例としてMgと無添加(Nm)フィルムについて、部分放電パルスの放電電荷とその発生位相（印加電圧に対する）との関係をプロットしたグラフである。図中の正弦波は印加電圧の波形を示している。測定時の印加電圧は2kVである。

MgフィルムとNmフィルムとを比較すると、部分放電パルスの最大放電電荷にはほとんど差がない。しかし、図におけるプロットの密度には差異が生じている。Mgフィルムにおけるパルスの発生数は、Nmフィルムに比べて少なくなっている。すなわち、フィルム表面に発生する部分放電は、フィルムにMgを添加することにより低減されている。なお、パルス発生数を1cycleあたりで平均すると、Nmフィルムでは約1.4発、Mgフィルムでは約0.6発となる。

実験に用いた添加剤のうち、図2のMgフィルムで示したような部分放電の低減に顕著な効果を持つ添加剤は、MgのほかにAbとMbであった。

#### 3.2 部分放電低減効果に及ぼす添加剤の種類の影響

図3は、印加電圧位相にして30degごとの区間における部分放電パルスの放電電荷の積算値（区間積算値）を示したものである。図では100cyclesでの放電電荷の区間積算値を絶対値で示している。

図に示すように、AbおよびMgフィルムにおけるパルスの放電電荷の区間積算値は、Nmフィルムと比較すると、低減している。一方Nbフィルムでは、低減効果は観測されない。Mb、Mrフィルムについては、煩雑さを防ぐため、図3には示していないが、MbではAbとほぼ同様に放電電荷の区間積算値が低減する。Mrについては、わずかな低減効果を示すが顕著ではない。

図4(a)および図4(b)は、それぞれ100cyclesにおける部分放電パルスの放電電荷の総和および発生数の総和を、フィルム試料ごとに示している。図では、測定された正と負のパルスを別々に示している。図4(a)に示すように、Nmフィルムに比べ、Mb、Ab、Mgを添加したフィルムでは放電電荷の総和が減少している。すなわち、この3種類の添加剤を用いると、部分放電が低減する。Mgフィルムを使用したときの放電電荷の総和は、Nmフィルムと比較して約40%にまで減少している。

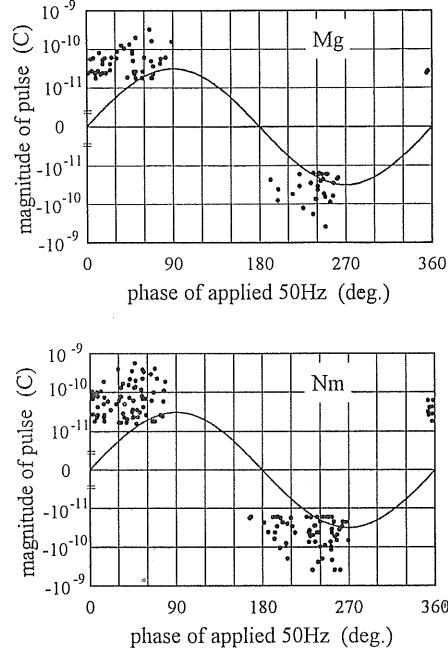


図2 部分放電パルスの放電電荷と印加電圧位相との関係  
印加電圧：2kV、印加電圧 100 cycles の積算。

Fig. 2 Relation between strength of PD pulse and phase of applied voltage.

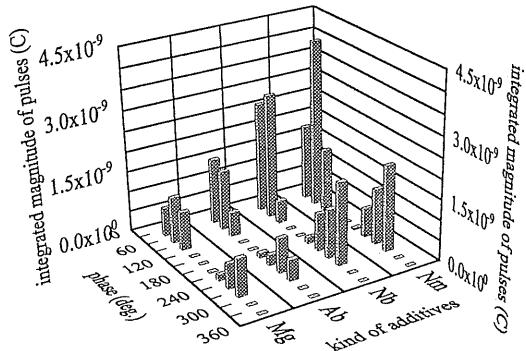


図3 印加電圧位相 30 deg の区間で発生する部分放電パルスの放電電荷

印加電圧：2kV、放電電荷は絶対値で示している。印加電圧 100 cycles の積算。

Fig. 3 Integrated strength of pulse during each 30 deg of applied voltage phase.

図4(b)におけるMb、Ab、Mgを添加したフィルムの放電発生数の総和も、Nmフィルムに比べて減少している。その減少率は、たとえばMgフィルムの場合、正パルスで約50%、負パルスで約41%となる。放電電荷の総和の減少率(40%)と比較すると、正パルスでの低減効果は発生数にのみ依存しているとは言い切れない。

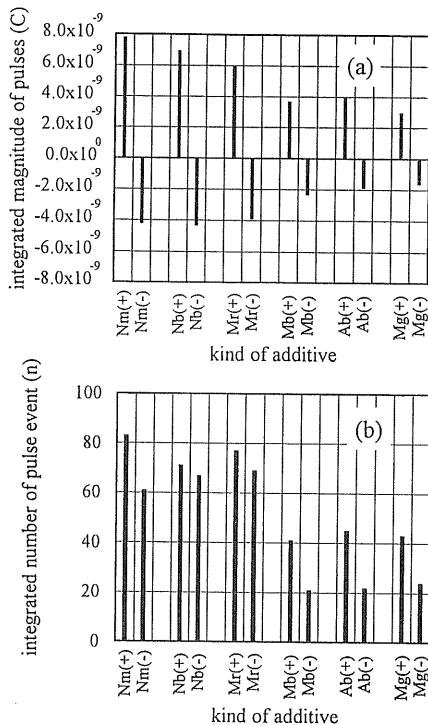


図 4 添加剤の種類による部分放電の放電電荷の総和および発生数の総和の変化  
(a)放電電荷の総和、(b)発生数の総和  
印加電圧: 2 kV, 正・負パルスを別々に示している。  
放電電荷の総和: 印加電圧 100 cycles での部分放電  
パルスの放電電荷の積算値。

Fig. 4 Dependences of integrated strength and event number of PD on kind of additives.

実験を行った印加電圧の範囲 (1.4~3.0 kV) では, Mg, Ab, Mb の各フィルムにおける部分放電の低減効果が観測された。ただし、印加電圧が 3.0 kV になると, Nm フィルムに対する部分放電の減少率が低くなる傾向を示した。

### 3.3 フィルム表面における電荷減衰特性

表 2 は、コロトロンにて  $\pm 1,500$  V に帶電させたフィルム試料について、帶電終了 10 分後の表面電位を示したものである。表には正・負両帶電の場合について示してある。正帶電の場合、Ab, Mb および Mg の各フィルムの電位減衰は Nm フィルムに比べて速い。実験を行った限りでは、正帶電電荷の減衰が速いフィルムの添加剤 (Ab, Mb, Mg) と、部分放電の低減に顕著な効果があらわれる添加剤とが一致している。負帶電の場合は、このような一致が見られない。

部分放電の低減に有効なこれら 3 種類の添加剤において、Ab には電子供与基が存在し、Mb には負極性対イオンが存在する。Mg は電子供与基と負極性対イオンの

表 2 帯電させた添加フィルムの 10 分後における表面電位  
初期帶電電圧:  $\pm 1,500$  V.

Table 2 Surface voltage decay at 10 min after initial charging.

添加剤	初期帶電から 10 分後の表面電位	
	正 帶 電	負 帶 電
Nb	+1,190 V	-1,175 V
Mr	+1,114 V	-1,127 V
Ab	+750 V	-1,216 V
Mb	+922 V	-1,050 V
Mg	+783 V	-1,021 V
Nm	+1,140 V	-1,190 V

両方が存在するものである。逆に、部分放電の低減効果が認められない Nb には、電子供与基と負極性対イオンのどちらも存在しない (Nb には電子受容基が存在する)。ただし Mr は、電子供与基を有しており、部分放電が低減する傾向は見られるが、その傾向は顕著ではない。

二層構造試料における低減の理由として、電子供与性の添加剤からフィルムバルク内へ放出された電子が、フィルム表面に帶電・蓄積した正電荷に向かって移動し、正帶電・蓄積電荷を見かけ上中和する結果、フィルムの表面電荷分布が変化し、部分放電が低減するものと考えた<sup>3)</sup>。表 2 に示したようにフィルムの正帯電電荷の減衰速度が速いことから、今回の実験においてもフィルム上の正帯電・蓄積電荷が見かけ上中和されやすくなっているものと予想される。したがって今回実験を行ったフィルム 1 枚の試料においても、高電界下において電子供与基から放出された電子あるいは負極性対イオンのフィルムバルク内の移動が基になって、部分放電が低減するものと予想される。

一般的には、添加剤による部分放電の低減効果の原因としては、フィルムの誘電特性や体積・表面抵抗の変化が考えられる。しかし、 $\epsilon_r$ ,  $\tan \delta$  については 2.1 節で述べたように、30 Hz~100 kHz で添加剤による変化は観測されてない。また体積・表面抵抗についても、同じく 2.1 節で述べたように、添加剤の混入によりそれらの値は 1 枠以内で低下が観測されるが、得られた値そのものと部分放電の低減とに単純な対応は見られなかった。

### 4. ま と め

球-平板構成の電極間に添加剤の入った 1 枚の PMMA フィルム試料を挟み、フィルム表面で発生する部分放電の低減に及ぼす添加剤の効果について検討を行った。

見かけの放電電荷の絶対値が  $1 \times 10^{-11}$  C 以上のもの

について測定した結果、単層構造すなわち添加フィルム1枚であっても、部分放電の添加剤による低減効果が現れることがわかった。低減効果のある添加剤は、本実験で使用したものの中 Ab, Mb, Mg である。Mg フィルムでは、印加電圧 2 kV における放電電荷の総和で比較すると、無添加のものに比べて 40% 程度にまで低減した。

また、フィルム表面の電荷減衰-時間特性を測定した

ところ、部分放電の低減効果を示す添加剤の入ったフィルムと、正極性の表面電荷の減衰速度が無添加のものと比べて速いフィルムとが対応することがわかった。

### 参考文献

- 1) H.C. Miller: IEEE Trans. on EI, 24 (1989) 765
- 2) Y. Yamano: IEEE Trans. on EI, 28 (1993) 372
- 3) 福地康範, 山野芳昭: 電気学会論文誌 A, 115 (1995) 1294