J. Inst. Electrostat. Jpn.

論

# 

## DC and AC Flashover Characteristics on Insulating Surface between Foil Conductors of Narrow Gap Yoshiaki YAMANO<sup>\*,1</sup> and Koki IMAI\*

(Received July 7, 2009; Accepted January 14, 2010)

DC and AC flashovers between a pair of thin copper foils on an insulating board, which imitates a printed wiring board, were studied in controlled air (20°C and 50%RH.). Two types of the boards, with and without earthed backing electrode were used. The studied ranges of gap distance (*d*) and board thickness (*t*) were 20  $\mu m \le d \le 1,000 \mu m$  and 60  $\mu m \le t \le 800 \mu m$ , respectively. As for impulse flashovers, they were studied previously using the same board. The main results obtained in this study are as follows: Flashover voltages (FOV) for the boards depend on the type of applied voltage; in the range of *t* studied. In the case of  $t = 800 \mu m$  or the board without the backing electrode, the maximum electric field strength on the electrode tip at the flashover is almost unchanged even when *d* is changed. When  $d \le 50 \mu m$ , FOV<sub>(DC)</sub> and FOV<sub>(AC)</sub>, are almost independent of *t*. AC flashover follows the appearance of partial discharge (PD) when  $d \ge 30 \mu m$  and  $t \ge 800 \mu m$ . On the other hand, the PD before the flashover is unobserved when  $d \le 30 \mu m$  and  $t \le 100 \mu m$ . These results are discussed basing mainly on the computed electric field condition on the board surface and the effects of the space charge on the surface.

## 1. はじめに

今日の電子機器は、小型軽量化と高機能化を同時に実現さ せることが要求されている.そのため、そこで使用するプリ ント配線板は信頼性を低下させることなく、小型軽量化と高 密度配線化を図る必要がある.プリント配線板の絶縁信頼性 に関わる要因は長期的なものと短期的なものの2つに分ける ことができる.長期的な要因としては、耐イオンマイグレー ション性<sup>1</sup>,熱的耐久性<sup>2</sup>そして耐環境性(温度,湿度および 汚損)などが挙げられる.このような要因が、たとえばプリ ント配線板の絶縁耐力を低下させる.一方、短期的な要因は 耐過電圧性や耐サージ性などのように短時間のストレス下で の絶縁信頼性に関わるものである.これは、電源ラインや外 部信号ラインから進入する異常サージや過電圧あるいは ESD に対し、清浄で劣化のないプリント配線板の絶縁耐力を知る 上で必要なものである.

プリント配線板の導体パターン間の絶縁耐力に上述した長期的な要因が及ぼす影響については、いくつかの検討結果が

**キーワード**:微小ギャプ,箔状電極,沿面フラッシュオー バ,ファインパターン,プリント配線板

\* 千葉大学教育学部(263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33) Faculty of Eucation, Chiba University, 1-33 Yayoicho Inage-ku Chiba-shi 236-8522, Japan

<sup>1</sup> yamano@faculty.chiba-u.jp

報告されている<sup>3-6)</sup>.また,IEC では試験結果や実績に基づい て<sup>7-8)</sup>,電気・電子機器に使用されるプリント配線板において 必要とする導体パターン間距離について,プリント配線板の 吸湿特性や汚損状態を考慮した値が規定されている<sup>9,10)</sup>.しか し,数 10 µm 程度の微小な導体間距離を有するプリント配線 板の沿面フラッシュオーバと数 100 µm の導体間距離での沿 面フラッシオーバとはその発生過程や特性が異なるはずであ る.さらには,導体間の基板表面の存在が沿面フラッシオー バに及ぼす影響も異なるであろう.このような観点からみる と,清浄で劣化のない絶縁物表面において極めて薄い電極で 構成された間隙で発生する沿面フラッシオーバの基本的特性 の解明はほとんど行われていない.

我々はモデル化した導体パターンを有するプリント配線板 試料を用いて、インパルス電圧 (Imp 電圧) 印加時の沿面フ ラッシオーバ特性について検討を行ってきた<sup>11-13)</sup>. 検討を行 った導体間距離 (ギャップ長; *d*) は 20 μm  $\leq d \leq 1,200$  μm の範囲である. 検討の結果, 配線板の厚さが厚い場合は、フ ラッシオーバ電圧 (FOV) における電極先端の最大電界強度 が,*d*の値にかかわらずほぼ一定の値を示すことがわかった. 一方, 配線板の厚さが 100 μm 程度以下の場合には、*d* が長く なるにつれ、FOV は絶縁物上に付着・帯電する電荷の影響を 強く受けることが判明した. 本研究では、上で述べた ImpFOV 特性の検討に使用したプリ ント配線板試料と同じものを用いて、直流 (DC) および交流 (AC) 電圧の印加における FOV 特性について、ImpFOV 特性 と比較しながら検討を行った. 箔状の電極で構成した微小間隙 における DC および ACFOV 特性について、ImpFOV 特性と比 較しながら検討を行った報告例は極めて少ない. 試験試料への DC および AC 電圧の印加時間は、Imp 電圧印加時間に比べて 極めて長い時間となる. そのことが原因となり、部分放電の発 生やそれに基づいて絶縁物表面に帯電する電荷の状態が変化 し、DC および AC 電圧印加時におけるフラッシオーバの発生 過程が Imp 電圧印加時とは異なることが考えられる.

## 2. 実験方法

## 2.1 プリント配線板試料

使用したプリント配線板の形状を図1に示す. プリント配線板はガラス布強化エポキシ樹脂積層板(図中のD)上に 銅箔電極が存在するものである. 銅箔電極は,厚さは6 µm であり,溶液エッチング法により図に示す形状に成形を行った. 積層板の厚さ(絶縁厚; t)は 60 µm  $\leq t < 800$  µm の 範囲である. 実験を行ったギャップ長(d)の範囲は 20 µm  $\leq d \leq 1,000$  µmである. 最小ギャップ長となる20 µmは,溶 液エッチング法にて正確なギャップ長の試験試料を作成で きる限界に近い値である.

本実験では、電極が配置されている絶縁物表面の裏側に導 体箔(裏面電極; 図中のE)が存在する場合としない場合の 両方について取り扱った. 裏面電極は、実際のプリント配 線板の裏面や層間の配線導体が表面のギャップ間の直下に 存在する場合を模擬している.

また、電極角部のエポキシ樹脂モールド(図中のF)は、 測定において電極の角部からのフラッシオーバを防止する ためのものである.これにより、同一試料にて15回のフラ ッシオーバを発生させても、フラッシオーバは電極の角部 に集中することなく、電極表面上でランダムに発生した.

### 2.2 FOV 等の測定

図1に示す試験試料の電極間(C<sub>A</sub>-C<sub>E</sub>間)にDCおよびAC 電圧を印加して,それらのフラッシオーバ特性を大気中 (20℃,50%RH)で測定した.電圧印加電極(C<sub>A</sub>)は,DC

あるいはAC電源から保護抵抗(1 M  $\Omega$ )を介して接続されている. C<sub>A</sub>に対向する電極(C<sub>E</sub>)と裏面電極(E)は共に接地されている. FOVの測定時における印加電圧の上昇速度は、DCおよびAC電圧とも10 V/sとした.

あるギャップ長(*d*)と絶縁厚(*t*)におけるFOVを求める際 は、5つの試験試料を用意し、それぞれについて5分毎に15 回の電圧印加を行った.5個の試験試料それぞれの6-15回目 の電圧印加におけるフラッシオーバ電圧値を5つの試料全 てについて平均した値をFOVとした.1-5回目までのフラッシュオーバは電極と絶縁物表面のコンディショニング効果 を図るためである.なお、5個の試料の6-15回のフラッシオ ーバ電圧のばらつきはFOVの5%以内であったので、本論文 で提示するFOVに関する全てのグラフには、データのばら つき範囲を示していない.

以下において,たとえば正極性DC電圧印加時のFOVを "FOV(+DC)"と,AC電圧印加時のFOVを"FOV(AC)",Imp電圧 印加時のFOVを "FOV(Imp)"と略記する. なお,FOV(AC)は 交流正弦波電圧の波高値で示す.

## 2.3 AC 電圧印加時に発生する部分放電(PD)の測定

不平等電界下でAC印加電圧を一定速度で上昇させると, 電極からPDが顕著に発生することが一般的によく知られ ている.PDにより発生した電荷が電極近傍の積層板表面に 帯電・蓄積すると,それにより電極表面および近傍の電界 が変化する.すなわち,帯電電荷とPDの発生形態がフラッ シオーバ特性に大きな影響を与えることになる<sup>14)</sup>.本研究 では,FOV(AC)特性の検討のため,交流電圧を試験試料に印 加して PD の発生状態の観測を行った.観測は,PD に基 づくパルス状電流を検出インピーダンス ( $R = 1 \text{ k}\Omega \ge C =$ 0.047 µFの並列回路) により検出し,検出した電流信号波形 をデジタルストレージオシロスコープに取り込んで行った.

## 2.4 試料電極付近の電界の数値計算

試験試料の電極周辺の電界を電荷重畳法<sup>15)</sup>による数値計 算によって求め,計算結果(電界の強度と方向)と測定し た FOV との関連性を検討した.電界の数値計算は,試験 試料の断面を模擬した2次元の電極形状で行った(図2).





Fig. 1 Configuration of test sample and Schematic diagram for experimental setup.



図2 電界計算に用いた2次元形状モデル(高電圧電極先 端近辺)

Fig. 2 Configuration of 2-d model used for calculation (around HV electrode edge).

89(43)

計算に使用した高電圧印加電極の先端部の形状は前報<sup>13)</sup> と同じである.

## 3. 実験結果と検討

## 3.1 FOV(DC)および FOV(AC)とギャップ長(d)との関係

図3にFOV(DC)およびFOV(AC)とdとの関係を示す.代表例 として,絶縁厚 $t = 60 \mu m$ の場合について示してある.参考 のため,図にはFOV(Imp)特性<sup>11)</sup>も示してある.図3aと図3b は,裏面電極有りの配線板におけるそれぞれ正極性と負極 性電圧印加の場合のFOV特性である.FOV(AC)については, 図3aと図3bの両方に載せてある.図3cは裏面電極なし( $t = \infty$ )の場合の配線板におけるFOV特性である.

印加電圧の種類の違いによるFOVの大小関係は、測定したdの範囲では、裏面電極の有無に関わらず、FOV(Imp) > FOV(DC) > FOV(AC)の順となる. この順番は、実験を行った絶縁厚(t)の範囲で変わらない. また、前述したように、全てのデータについてばらつきが平均値の5%以内であったので、裏面電極有りの場合、 $d \ge 200 \mu m$ においては、その差がわずかではあるがFOV(+DC) > FOV(-DC)となっており、両者には有意差が存在する. さらには、印加電圧の種類にかかわらず (Imp電圧も含めて)、 $d \ge 200 \mu m$ の範囲においては、裏面電極有りの場合より無しの場合の方が高いFOVとなっている.

図3における20  $\mu$ m  $\leq d \leq 50 \mu$ mのギャップ長のFOV特性 について拡大して示したグラフが図4である.図4aと図4b はそれぞれ裏面電極有りの場合と無しの場合 ( $t = \infty$ )の特 性を示している.

図 4 に示した 20  $\mu$ m  $\leq d \leq 50 \mu$ m における FOV 特性の 特徴な点は以下のとおりである. ①図 4a に示すように, 裏 面電極が存在する場合の FOV(DC)において, 印加電圧の極 性の違いによる変化がほとんどなくなる. ②裏面電極の有 無による FOV(DC)および FOV(AC)の違いが極めて少ない.

## 3.2 FOV(DC)および FOV(AC)と絶縁厚(t)との関係

図5にFOVと絶縁厚(*t*)との関係を示す.図5a,図5bおよび 図5cは,それぞれFOV (+DC),FOV (-DC)およびFOV(AC)を示 している.図に示すように, $d \leq 50$  µmでは,FOV (±DC)の 値およびFOV(AC)の値は,*t*を変化させてもほとんど変わら ない.一方, $d \geq 200$  µmの範囲では,*t*が厚くなるとともに FOVは上昇する.ただし, $d \geq 200$  µm におけるFOV(AC)の 場合(図6c),*t*の増加に伴うFOVの上昇は,FOV (±DC)の場合 (図5aと図5b)に比べて少ない.

## **3.3 DC および ACFOV に影響を与える要因**

本研究で用いた試験試料の特徴は,2 つの箔状電極が微 小な間隔を隔てて絶縁物表面上に存在していることである. 電極が箔状であるから,電極先端の電界は極めて高く,後



図 3 FOV と導体間距離(*d*)との関係 *t*: 絶縁厚. なお, 各グラフとも参考のため FOV(Imp)の 特性を示してある.

Fig. 3 Relation between FOV and gap distance (*d*).



図4 FOVと導体間距離(*d*)との関係 (*d*≤50 µmにおける特性).

a: 裏面電極ありの試料におけるFOV, b: 裏面電極な しの試料におけるFOV. *t*: 絶縁厚.

Fig. 4 Relation between flashover voltage and gap distance of the short range. 述するように, 陰極電極の先端からの電子の電界放出が極 めて容易に起こることが予想される. Imp 電圧印加と比べ て, DC あるいは AC 電圧印加は, 試料に電圧を印加して からフラッシオーバに至るまでの時間が極めて長いため, 電界放出や部分放電の発生に基づく電荷が, Imp 電圧印加 時よりもギャップ間に豊富に供給される. 特に沿面放電の



図5 FOV と絶縁厚(t)との関係

a: 裏面電極ありの試料における FOV(+DC), b: 裏面電極 ありの試料における FOV(-DC), c: 裏面電極あり試料に おける FOV(AC). d: 導体間距離.

Fig. 5 Relation between FOV and sheet thickness (t).

場合は、ギャップ間に供給された電荷が絶縁物上に帯電・ 蓄積しやすく、沿面フラッシオーバ特性に顕著な影響を与 えることが予想される.このような観点に基づき、3.1 およ び 3.2 で示してきた FOV(DC)および FOV(AC)特性について、 以下の 3 つの項目に触れながら検討を行っていく.すなわ ち、①電界計算によって求めた静電界(空間電荷なしとし て計算) と FOV との対応、②直流電圧印加時における帯 電・蓄積電荷による電極先端の電界緩和、③交流電圧印加 時における部分放電とフラッシオーバとの関連について検 討を行う.

## 3.3.1 FOV における電極表面の最大電界強度(Emax)

絶縁厚  $t = 800 \,\mu\text{mb} t = \infty$  (裏面電極なし)の場合, Imp 電圧印加時のフラッシュオーバ直前における電極表面の最 大電界強度 ( $E_{max}$ )は,実験を行ったギャップ長(d)の範囲に おいてほぼ一定の値(およそ100 kV/mm)になることを前報<sup>13)</sup>で 示した.そこで、今回測定を行ったDCおよびAC電圧印加 時における $E_{max}$ についても検討を行った.なお、電極表面 で最大電界強度を示す個所は、図2に示した2次元電極モデ ルにおいてPで示したところ ( $\alpha \approx 59.9$  deg.) である.

本実験における測定結果をもとに計算した $E_{max}$ とギャッ プ長(*d*)との関係を図6に示す.図6a,図6bそして図6cはそれ ぞれ+DC電圧印加時,-DC電圧印加時そしてAC電圧印加時 における関係である.これらの図が示すように,DC印加電 圧の極性に関わらず,またAC電圧印加時においても,絶縁 厚 $t = 800 \mu m$ の場合と $t = \infty$ の場合は,測定したギャップ長 (*d*)の範囲において $E_{max}$ はほぼ一定の値を示している.ただ し,一定となる $E_{max}$ の値自体は,(+DC)  $\approx$ (-DC) > (AC)で ある.一方, $t = 60 \mu m$ と $t = 100 \mu m$ の場合は,印加電圧の種 類やその極性にかかわらず,*d*の増加とともに $E_{max}$ は上昇 する.このことは, $t = 60 \mu m$ と $t = 100 \mu m$ におけるFOV(Imp) の $E_{max}$ においても<sup>13</sup>)ほぼ同じ傾向がみられる.

## 3.3.2 絶縁物上に帯電する電荷がフラッシオーバに及ぼす 影響



まず, *t* = 60 μm と *t* =100 μm において *E*max がギャップ長

図 6 フラッシオーバ時における電極表面上の最大電界強度と導体間距離との関係 a: 裏面電極ありの試料における FOV(+DC), b: 裏面電極ありの試料における FOV(-DC), c: 裏面電極あり試料における FOV(AC). *t*: 絶縁厚.

Fig. 6 Relation between gap distance and the maximum electric field strength on electrode at flashover.

d の増加とともに上昇する現象について取り扱う. これに ついては, Imp 電圧印加時と同様に<sup>13)</sup>, 絶縁物表面におけ る電界の方向に原因があると考えられる. すなわち絶縁厚 tが薄い場合には,  $d > 約200 \mu m$ になると, 電極から離れ た絶縁物表面における電界は、絶縁物表面に水平な成分に 比べて垂直な成分が強くなる. 図7は、計算で求めた電界 の強度とその方向をもとに、代表的なギャップ長(d)と絶縁 厚(t)における電気力線の様子を計算した結果を示したも のである. 図7a (d=200 µm, t=60 µm) と図7b (d=200 µm, t = 800 μm)における電気力線と絶縁物表面とが交差する 角度(図 7a の' $\theta$ ')を比較すると、 $t = 60 \mu m$ の方がより直 角に近い値となる. すなわち, 絶縁物表面に垂直な電界成 分が強くなる. そのことにより, 放電に基づいて発生した 電荷(ホモ電荷)は絶縁物表面に帯電しやすくなるので、 放電の進展が抑制される方向に作用する. DC 電圧は極性 が変化しないので、FOV(DC)は上昇することになる. AC 電 圧印加時についても,発生する PD に起因して発生したホ

モ電荷の帯電は同極性 PD の進展等を抑制する方向に作用 する.つまり、図6に示した Emax はホモ電荷の帯電を考慮 せずに計算により求めた値なので、帯電電荷の影響を受け て FOV が上昇すると Emax も高い値となる.

また,発生する PD の極性が周期的に変化する AC 電圧の場合,極性の変化時にホモ電荷と作用していた電荷がヘテロ電荷として作用して PD の進展を助長させる.図6に示した Emax が (DC)>(AC)となっているのは,このことが原因と考えられる.

次に、実験を行ったすべての範囲においてFOV(Imp) > FOV(DC)となる原因について考察する. 電圧を印加してから フラッシオーバに至るまでの時間は, Imp電圧印加時よりも DC電圧印加時の方が極めて長い. したがって、DC電圧印 加時には、Imp電圧印加時と比べると、ホモ電荷による電極 先端の電界緩和効果を発揮するのに十分な電荷の帯電・蓄 積が生じているはずである.このことを考えると,FOV(DC) >FOV(Imp)となるはずである.しかし,図3と図4で示したよ うに、実験を行ったすべての範囲においてFOV(Imp)> FOV(DC)となっている.この原因は、放電開始に必要な初期 電子の不足と電圧印加からフラッシオーバに至るまでの経 過時間の違いによるものと考えられる. すなわち, 短いギ ャップ間を箔状電極が対向している空間では放電開始に関 与できる偶存電子の存在確率が低く, 電圧印加からフラッ シオーバに至るまでの経過時間が、DC電圧と比べてImp電 圧では極めて短いので、結果としてFOV(Imp) > FOV(DC)とな るものと考えられる.

なお,図5に示したように,FOV(DC)およびFOV(AC)が $d \leq$  50  $\mu$ mの範囲で絶縁厚(t)の変化に対して依存性を示さな



図7 高電圧電極周りの電気力線の様子

a: 導体間距離 200 µm, 絶縁厚 60 µm の場合, b: 導体間距離 200 µm, 絶縁厚 800 µm の場合. d: 導体間距離, t: 絶縁厚. Fig. 7 Typical examples for electric force lines around the triple junction.

# 表1 フラッシオーバ前に部分放電(PD)の発生が観測される範囲

Table	1 Map for appearance of P	PD before flashover in relations
to gap	distance and sheet thickness	S.

Board	Gap distance ( <i>d</i> )					
thickness (t)	(mm)					
(µm)	20	30	50	200	1000	
60	-	_		$\checkmark$		
100	-	_	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	
800	-	_	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	
$\infty$	-	_	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	

√: PDあり, -: PDなし.

い. その理由については,  $d \leq 50 \mu m$ の範囲で, 電極先端 の電界強度および絶縁物表面の電界強度がtの変化(実験を 行った範囲の変化)に対してほぼ一定の値を維持すること に起因していると考えられる<sup>13)</sup>.また,最も薄い $t = 60 \mu m$ においても,  $d \leq 50 \mu m$ の範囲では絶縁物表面における電 界の垂直成分が水平成分に比べて弱いので<sup>13)</sup>,  $d > 200 \mu m$ のときほど電荷が高密度に帯電しにくい状態になっている ことも理由の1つと考えられる.

### 3.3.3 AC フラッシオーバ特性における部分放電 (PD)

AC 電圧印加時は、フラッシオーバ前に発生する PD や電 極先端からの電界放出等に起因して絶縁物上に電荷が帯電 蓄積するので、印加電圧の極性反転により PD の発生が助 長される.それにより AC 電圧印加時にはフラッシオーバ が誘発しやすい状態となる.一方 DC 電圧印加時には、た とえ PD が発生しても、それにより絶縁物上の帯電した電 荷はホモ電荷として作用し続けるため、電極先端の電界は 緩和される.そのため、FOV(DC) > FOV(AC) となるものと 考えられる.

表1はAC 電圧を印加してからフラッシオーバに至るま で一定速度で上昇させている間に, PD が観測されるギャ ップ長(*d*)と絶縁厚(*t*)の領域を示したものである.ただし, 測定を行った際のPDの最少検出感度は1pC である.表で はPD の発生を経てフラッシオーバに至る場合は'√で, PD の発生なしに直接フラッシオーバが発生する場合は'-'で 示してある.不平等電界を形成する電極間で AC 印加電圧 を上昇させていくと、PD が顕著に発生することは一般的 によく知られている.しかし本実験では  $d \leq 30$  µm になる と、表に示すように、フラッシオーバ前に PD の発生は観 測されなくなる.これは、電極間距離が短いために、発生 した PD の放電電離域が対向電極にまで達してしまい、最 初に発生した PD が消滅することなく成長して、フラッシ オーバに至るためと考えられる.

なお,前述したように本実験の測定における PD の最少 検出感度は1 pC であり,  $d \leq 30$  µm においては, 検出感度 以下のみかけの放電電荷を持つごく弱い PD が生じている か、あるいは電極からの電子の電界放出が生じている可能 性がある.なぜなら、印加電圧が300 Vにおける電極先端 の最大電界は、計算によると d = 30 µm, t = 60 µm のとき に 6.2×10<sup>8</sup> V/m となる. この値は陰極からの電子の電界放 出には十分な強さ<sup>16)</sup>である.このことについては、現在の ところ明確には検証できていない.しかし、印加電圧の極 性が周期的に変化する AC 電圧において、ごく微弱な PD や電極からの電子の電界放出に起因して電極先端近傍の絶 縁物表面に帯電した電荷の影響を受けることによって、電 極先端の電界が周期的に強くなる現象が生じていることが 予想される. このギャップ長の領域での電界放出の特性や 微小な PD 発生の有無などに関して、更なる検討が必要で ある.

## 4. まとめ

絶縁板上に一対の箔状電極を設けた試料を用いて、ギャップ長dが 20  $\mu$ m  $\leq d \leq 1,000 \mu$ mの範囲におけるDCおよ びAC電圧印加時の沿面フラッシオーバ電圧特性について、 以前に行われたImp電圧印加時の特性と比較しながら検討 を行った.使用した絶縁板は (厚さ;60  $\mu$ m  $\leq t \leq 800 \mu$ m) のガラス布強化エポキシ樹脂積層板であり、裏側に接地し た裏面電極が存在する場合としない場合の両方について取 り扱った.本研究によって得られた主な事項を番号順に整 理して以下に示す.

 (1) 実験を行った*dとt*の範囲において、印加電圧の種類 によるFOVの大小関係は、(FOV(Imp)) > (FOV(DC)) >
(FOV(AC))となる.この順番は裏面電極の有無によって変 化しない.

(2) t = 800 μmあるいは裏面電極なしの場合, DCおよび
AC電圧印加のFOVにおける電極先端の最大電界強度

(Emax)は、ギャップ長に依存せず、ほぼ一定の値となる. なお、Emaxの値は、空間電荷の影響を考慮せずに数値計算を行って求めた値である.

(3)  $d \leq 50 \mu m の領域におけるFOV(DC)およびFOV(AC)は,$ FOV(Imp)と同様に,  $t \sim 0$ 顕著な依存性が現れなくなる. (4) AC電圧を印加した場合,  $d \leq 30 \mu m 0$ 範囲では, t o値に関わらず, 電圧印加からフラッシオーバに至るまで みかけの放電電荷が1 pC以上の部分放電の発生が観測さ れない.

(5) 上項(1)で述べた (FOV(Imp)) > (FOV(DC))となる原因 については, Imp電圧印加の場合は, DC電圧印加の場合 と比べて, 放電開始に関与できる初期電子の数が不足す ることに原因があると考えられる. つまり, ギャップ長 が短いことに加えて, Imp電圧の場合はDC電圧と比べて 電圧印加からフラッシオーバに至るまでの時間が極端に 短いことが要因となっているものと考えられる.

(6) (FOV(DC)) > (FOV(AC))となる原因については、空間電荷(絶縁物上の帯電電荷も含む)の効果と考えられる. すなわち、DC電圧印加時には電極先端近傍に帯電したホ モ電荷が、電極先端の電界を緩和させるのに対して、AC 電圧印加時には電圧の極性反転によって電界が強くなる 効果が考えられる.

### 参考文献

- 電気学会・イオンマイグレーションの発生特性と防止方法 調査専門委員会編:プリント基板の試験と評価-イオンマ イグレーション現象とその対策、オーム社 (2007)
- JEC-6151 "電気絶縁材料の熱的耐久性試験方法通則" 電気学会電気規格調査会標準規格 (2008)
- E.W. Gray and D.J. Harringyon: IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 5 (1982) 142
- E.W. Gray: IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 8 (1985) 214
- 5) B.X. Du and S. Kobayashi: エレクトロニクス実装学会誌, 3 (2000) 148
- 6) 杜伯学,加藤景三,金子双男,小林繁雄:エレクトロニ クス実装学会誌、5(2002)401
- W. Pfeiffer, K. Richter and P. v. Schau: IEEE Trans. Elect. Insul., 19 (1984) 586
- W. Pfeiffer, K. Richter and P. v. Schau: IEEE Trans. Elect. Insul., 21 (1987) 397
- IEC 60664-1 Ed. 2, "Insulation coordination for equipment within low-voltage systems - Part 1: Principles, requirements and tests" (2007)
- 10) IEC 60664-5 Ed. 2, "Insulation coordination for equipment within low-voltage systems - Part 5: Comprehensive method for determining clearances and creepage distances equal to or less than 2 mm" (2007)
- 11) 山野芳昭, 高岡洋介: 電気学会論文誌 A, 123 (2003) 1130
- 12) 山野芳昭, 首藤克彦, 貫洞正明, 岡本勝弘:電気学会論文 誌 A, 127 (2007) 121
- Y. Yamano and K. Shutoh: IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul., 15 (2008) 357
- 14) たとえば Y. Yamano and T. Tsurumizu: IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul., 2 (1995) 492
- 15) T. Kohno and T. Takuma: *Numerical Calculation Method of Electric Field*, Chapter 5, Corona Publishing (1980)
- 16) 大木正路: 「高電圧工学」, p. 31, 槇書店 (1982)