

碍子表面の閃絡破壊特性におよぼす水滴の効果

岩住 圭一, 米沢 晃, 檜尾 哲久, 南部 公孝
北村 岩雄, 池田 長康

Effects of water drops on the flashover characteristics of insulator surface

Keiichi Iwazumi, Akira Yonezawa, Tetsuhisa Kashio, Kimitaka Nanbu
Iwao Kitamura, Nagayasu Ikeda

As the fundamental investigations to make compact insulators, we recorded and observed behaviors of single or water drops on two specimens; a tile surface and a silicone rubber (SR) surface which imitates them of a porcelain and hydrophobic insulator respectively, with 8mm video in high alternative electric field. At the same time, flashover voltages (FOV) were measured in both cases. It is found from the experiments that in the case of SR, water drops are separated and roll toward both electrodes and the decreases of FOV remain in small degree. It is also found that in the case of tile, water drops on it spread over the surface toward the both electrodes and the decreases of FOV are remarkably large.

キーワード： 碍子表面の水滴, 電界中での水滴の動き, フラッシュオーバー電圧.

1. まえがき

年々着実に増加するわが国の電力需要に対応するため、各電力会社では順次500kv送電を導入しており、さらには次世代の基幹系統として1000kv電送を推進している。このように、送電電圧がUHV化するにあたり、従来の技術を単純に延長したのでは鉄塔や碍子などの設備が巨大なものとなり、建設コストの上昇を避けることができない。さらには、国土の狭いわが国では環境への影響も配慮しなければならず、これら設備のコンパクト化が望まれる。

懸垂碍子は降雨の際、その表面状態が汚損し、閃絡破壊電圧（flashover voltage以下FOVと呼ぶことにする。）が低下する。このことが長大懸垂碍子が必要な理由である。我々はまず、碍子表面の雨滴がどのような過程を経て閃絡破壊に至るのかを詳細に調べることからはじめた。本研究は磁器碍子および複合碍子の表面の両方を模擬したタイルとシリコンラバー（silicone rubber 以下SRと呼ぶ）上に水滴を置き、交流高電圧を印加して水滴が比較的少量の場合どのような振る舞いをするのか把握するとともに、この水滴の振舞いとFOVとの関連を調べたので報告する。

2. 実験装置および実験方法

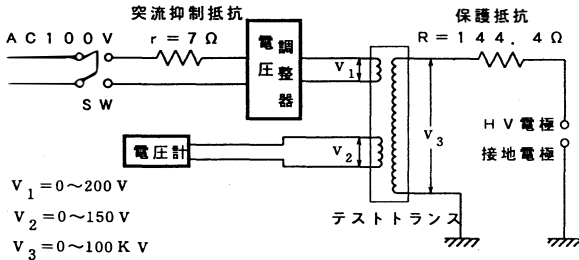


図1 実験回路図

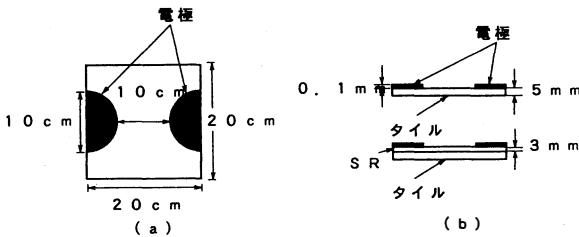


図2 供試材料の寸法

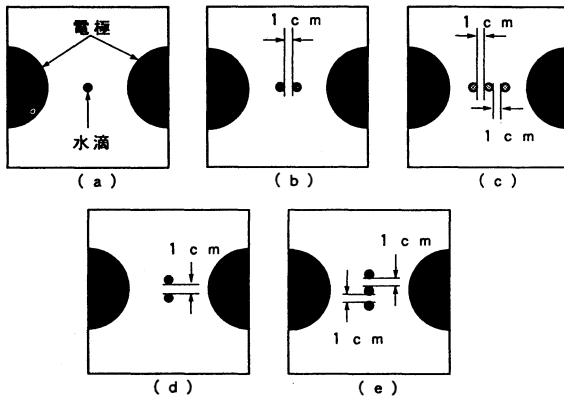


図3 水滴の配置

2.1 実験装置

本研究における実験回路図を図1に示す。また図2には供試材料表面がタイルとSRの2種類の場合の寸法を示す。電極はステンレス製薄板を用い、ギャップ長さは10cm一定である。図2(a)の電極間に電圧を印加したとき、不平等電界が生じる。しかし、実際の碍子を考えたときに、必ずしも平等電界ではないと考え、図2に示したような形状に決定した10cmのギャップについてはテストトランスの最高電圧を考慮して決められた。供試材料は設地された床面から50cmの高さに位置し、2つの長幹碍子によって支持されている。

2.1 実験方法

実験開始直前に直径10cmの球電極によりギャップ長が1.0cmから3.0cmの範囲において、0.2cm刻みでそれぞれ5回を測定する。5回のFOVの平均値に、気温と気圧によって決まる空気相対密度 δ を乗じる。これと10cmの既知の標準球FOVとの比を求め実際のFOVを算出している。

この実験は以下に示す(1)~(3)の条件で行われ交流高電圧(0~100kv, 60Hz)を印加し、この昇圧は約10kv/secの割合である。そして、水滴の振舞いの観測とFOVの測定がなされた。

- (1) 電極間中心に水滴を置き、その水量を変化させる。これを図3(a)に示す。
- (2) 両電極に平行に水滴を2つおよび3つ置き、その水量を変化させる。これを図3(b)および(c)に示す。
- (3) 両電極に垂直に水滴を2つおよび3つ置き、その水量を変化させる。これを図3(d)および(e)に示す。

これらの実験はタイルとSRについてそれぞれ行われた。一滴の水量は0~120 μ Lまで10 μ L刻みで行われ、すべて蒸留水(抵抗率:約110k Ω /cm)を用いた。また、FOVの測定はそれぞれ5回ずつ行った。

3. タイルおよびシリコンラバー上での沿面閃絡破壊実験

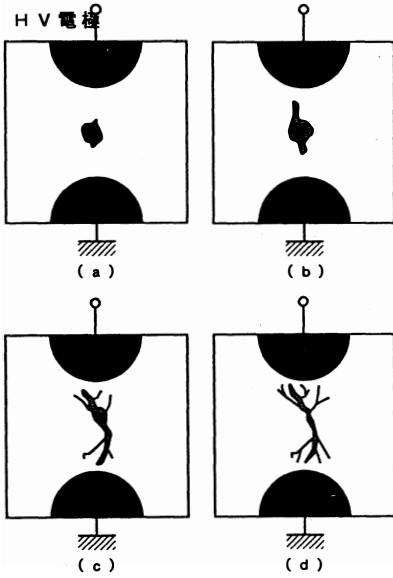


図4 電極間中心の水滴の振舞い

は図4(c)に示すように水滴全体から伸びだした細い線は枝分かれするようになる。水滴の影は小刻みに振動し、内部の水が電極間を往復運動しているのが観測される。コロナは一層強く輝き、この状態まで来ればたいていの場合閃絡する。まれに、図4(b)の状態まで閃絡を起こさない場合がある。枝分かれはさらに枝分かれを生じ、どこが水滴全体なのか見分けがつかない。内部の水は激しく往復運動する。

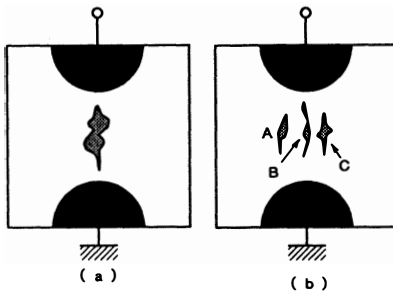


図5 複数の水滴の振舞い

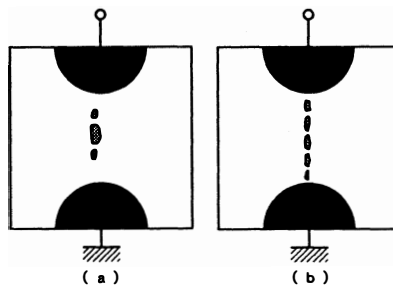


図6 SR 電極間中心の水滴の振舞い

3. 1 供試材料上の水滴の電界による形状の変化の観測

3. 1. 1 タイル上の水滴の場合 水滴（水量0～120 μ L）の振る舞いを観察するため8ミリビデオによって電圧印加前から閃絡に至るまでの水滴の様子が撮影された。なお、水滴の動きが分かりやすいように室内を暗くして、タイル面だけに横からの光が照射するように環境を設定した。これらの観測からの水滴には以下ような振る舞いがあることが確認された。

(a) 水滴一個電極間中央に置いた場合

電圧の上昇とともに水滴はその形状を変え、第1段階は図4(a)の状態にある。水滴は両電極方向にわずかな突起が見られる。しかし、水滴の影は揺れ始め、内部の水が動いているのがわかる。水滴の水量が少ない（40～50 μ L程度）の場合には水滴は全くその形状を変えずにそのまま閃絡破壊に至ることもある。さらに電圧を上げると図4(b)に示すように、水滴は、両電極に向かって細い線のように伸びる。電極近傍ではコロナが肉眼でも観測されるようになる。閃絡破壊直前で

(b) 電極に平行に水滴を置いた場合

図5(a)に示すようにそれぞれの水滴は両電極方向に伸びたし、隣の水滴と一体となって同方向に伸びる。これ以降は1つの水滴の場合と同じであるが、水量が多いため水滴の伸びる動きは速く、閃絡破壊に早くつながる。

(c) 電極に垂直に水滴を配置した場合

水滴の受ける力は電極方向のみであるためそれぞれの水滴は一体とはならず独立した振る舞いを示す。この状態を図5(b)に示す。個々の水滴の振舞いは1つの場合と同じであるが、同図のAの水滴の進展が早いときもあれば、Bの進展が早いときもありランダムである。

3. 2. 1 SR上の水滴の場合

(a) 水滴が1個の場合

SR上の場合もタイルと同様に第1段階は図4(a)に示したように水滴は両電極方向にかすかな突起を生じ、楕円形に歪

む。そして、水滴はタイル上よりも大きく振動する。電圧の上昇と共に、図6(a)に示すように水滴の両電極側先端は水滴本体とは分離するようになる。これは、SRの撥水性がタイルと比べて非常に高いためである。その後、同図(b)に示すように電極に最も近い水滴はすばやく電極近傍に達し、水滴本体もいくつかの小さな水滴に分かれる。このとき電極近傍ではひときは輝くコロナが見られる。タイルと同様水滴の量が少ない場合は図6(b)の状態までは至らず、初期の水滴の状態で閃絡破壊する。

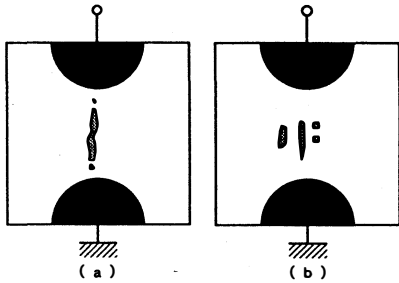


図7 SR 上の複数個の水滴の振舞い

(b) 電極に平行に水滴を配置した場合

図7(a)に示すように各々の水滴は楕円形に歪みタイル上の時のように隣の水滴に吸収される。それでも一体となった水滴は電極に最も近い部分において本体から分離した水滴が生じるようになる。1つの時と比べて水量が多いので電極間の水滴は細かく分離しない。

(c) 電極に垂直に水滴を配置した場合

図7(b)に示すようにタイル上と同様の力を受けるためそれぞれの水滴は一体とはならず独立して動く。ある水滴は数個に分離し、またある水滴は楕円形に歪んだまま閃絡破壊に至ることもある。

3. 2 閃絡破壊電圧 (FOV) の測定

図8に図2に示した5種類の場合につき、FOVの測定を行った。図中の○印および●印は5回の

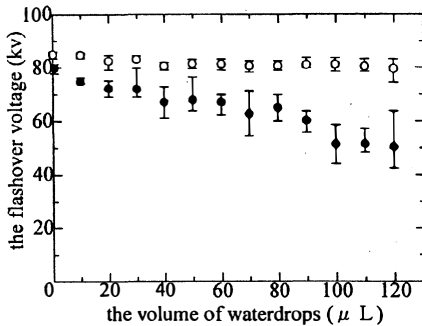


図8 (a)

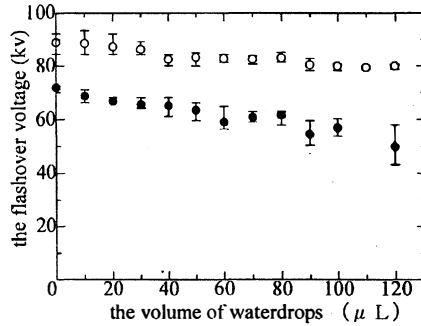


図8 (b)

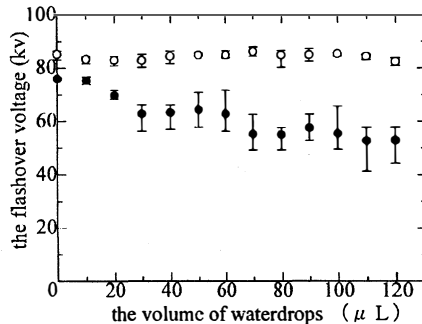


図8 (c)

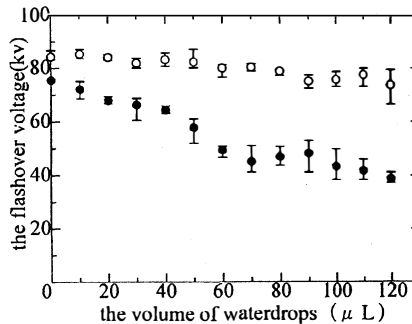


図8 (d)

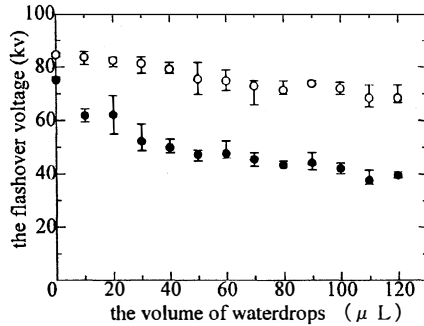


図8 (e) 各水滴の配置によるFOV

FOVの平均値で、黒丸はタイルのそして白丸はシリコンラバーのFOVを示している。上下のバーは上限と下限を示している。

図8(a)は電極間中心に水滴を一滴置いた場合のFOVの変化である。水滴がないとき、タイルとSRでは材料の相違からFOVが若干異なる。タイルの場合、水量の増加に伴いFOVは低下し、そのばらつきが大きくなっている。最も低いFOVは水滴のないときと比べて2/3以下となっている。一方のSRは水量の増加とともにわずかにFOVは低くなるが、ほとんど一定とみなしてよく、そのばらつきは小さい。

図8(b), (c)は電極軸に垂直に水滴をそれぞれ2個と3個配置した場合についてFOVを調べたものである。タイルの場合2個も3個もFOVはほとんど同じである。しかし、ばらつきは3個の場合が大きくなっている。SRの場合は2個および3個の場合でも、ほとんど一定のFOVを保っており、そのばらつきも非常に小さい。

図8(d), (e)は電極軸に平行に水滴をそれぞれ2個と3個配置してFOVを調べたものである。タイルの場合、2個の場合より3個の場合の方がFOVの低下は早くともに40kw付近で落ち着いている。ばらつきは垂直のときほど大きくない。一方のSRは垂直の場合と比べてFOVはやや低下する。2個、3個ともに最悪のFOVは最良の15%程度である。

4. 実験結果の検討

4. 1 水滴の形状の変化における検討

SRは撥水性の高い表面のために始め楕円形に歪み、水量が少ない場合には小さな水滴が電極方向に分かれて一直線に並ぶ。また水量が多い場合には、楕円形にはなるものの、小さな水滴に分かれにくい。一方、タイルの場合は水滴との接触角のほとんどが 0° であるので、電圧印加前よりタイルに付着している。電圧を印加すると水滴本体からは細い線が伸びだし、それがさらに枝分かれして電極方向に伸びる。ここで、水滴は伸びる原因を考えてみたい。

水滴が受ける力は2つ考えられる。配向力とクーロン力である。配向力は一方の電極を針としたときに確認されている。つまり、一方の電極近傍の電位勾配を極端に大きくしたとき水滴はその針電極に向かっていち早く必ず伸びだすのである。これは針電極が電圧印加電極そして接地電極であっても共通であった。今回用いた実験装置は薄い板の電極を用

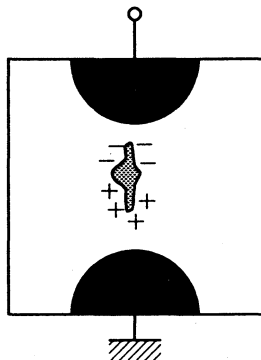


図9 水滴の分極

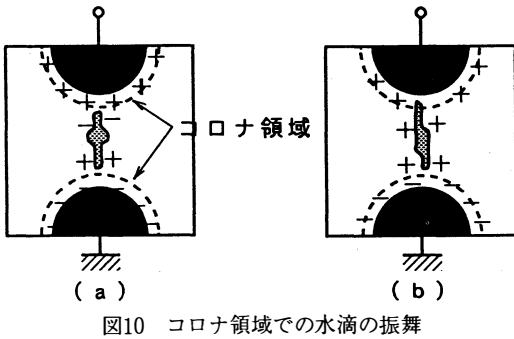


図10 コロナ領域での水滴の振舞

いており、横から針一針電極と見なしても良く、両電極近傍では大きい電位勾配があると考えられる。よって、水滴の動きに配向力が関与しているものと考えられる。また、水滴は電気的に分極しており、両電極に引き寄せられるとも考えられる。電圧印加電極が正の瞬間図8のように水滴は静電誘導によって、電気双極子となる。その結果水滴に存在する電荷は電極方向に引き寄せられる。電圧印加電極が負のときも極性が変わるだけで、結果は同じことである。以上の

ことをまとめると、水滴の初期の振舞いは配向力によるものと考えられ、次にクーロン力が加わってくる。これらは共に水滴を両電極に引き寄せるように働く。しかし、水滴は両電極近傍に達すると電極間を往復するような運動を見せる。これは、次のようなことが起こっていると考えている。電圧をある程度上げると、両電極近傍では肉眼でもコロナが観測されるようになる。コロナ領域は十分導電性が高く、ほとんど電極と同電位になっているものと考えられる。配向力での水滴の振舞いおよびクーロン力によって伸びる水滴の先端がコロナ領域に入ると図9(b)に示すように先端の水滴の極性もコロナ領域と同じになる。このため反発しコロナ領域から離れようとする。このような状況が両電極間で繰り返されるものと考えられる。この繰り返しが水滴内部で観測される振動運動のメカニズムであり、水滴が電極に達しない理由でもある。また、印加電圧は60Hzの交流であるがこの程度の周波数では、時事刻々の変化に追隨しているものと思われる。

4. 2 閃絡破壊電圧 (FOV) の比較による検討

既に図3に示した5種類の水滴実験では、いずれの場合もタイルよりシリコンラバーのFOVの方が高く、ばらつきが小さい。この原因は供試材料表面の撥水性が異なるために、水滴の電界中における振舞いが違うためである。タイルの場合、撥水性が低いので置かれた水滴は付着し広がり電極に一樣に近づくため、そのFOVは低下する。また、水滴は勢いよく電極に近づく時とそうでない場合があるため、FOVにばらつきが大きい。一方のシリコンラバーは水滴の振舞いに再現性があるため、FOVのばらつきが小さいと思われる。シリコンラバーのFOVは高いのは水滴が孤立分離するためと考えられる。つまり、その撥水性が高いために一樣に電極に近づくのではなく、水滴本体が分かれて電極に近づく。したがって、シリコンラバーのFOVは高いのではないだろうか。このことを確認するために、実際のタイトルとSRの水滴の振舞いを模擬してFOVの測定を行った。これを以下に述べる。

5. タイトルとSR上の水滴の振舞いの模擬実験

5. 1 模擬水滴のFOV測定手順

水を含ませたときの抵抗率 $1200\text{ k } \Omega / \text{cm}$ の濾紙をタイル表面上に実際の水滴の振舞いを模擬して配置した様子を図11(a)に示す。濾紙の面積は一定で両電極と濾紙先端との距離が小さくなるようにした。さらに、濾紙の面積は同一のタイル表面上に実際の水滴を置いたときの面積を測定してその値を使用した。この濾紙の一定水を

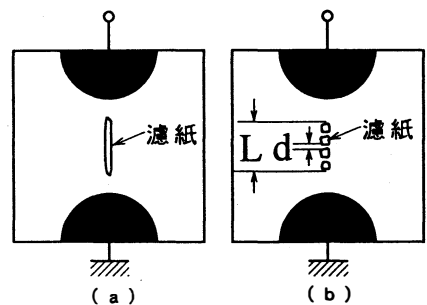


図11 水滴を濾紙で模擬したときの配置

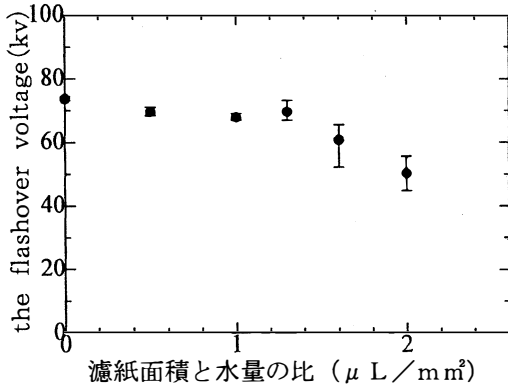
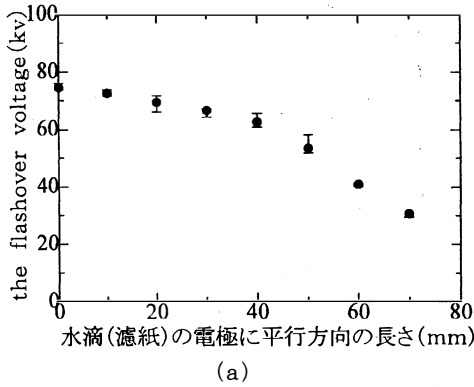
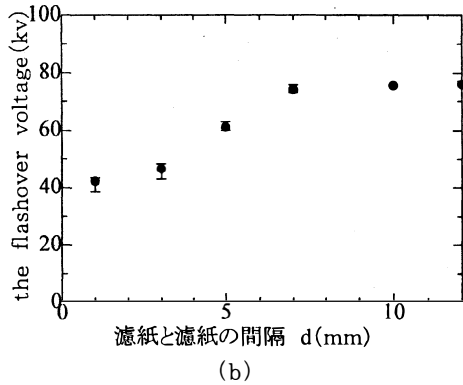


図12 水を含む濾紙のフラッシュオーバー特性



(a)



(b)

図13 濾紙で水滴を模擬したときのFOV

例えば、図13(a)で横軸が20mmのところでは、FOVは70kv程度である（連続ギャップは80mm）が、同図(b)で断続ギャップが80mmのところと言えば $d=3.33$ であり、FOVは50kv程度である。したがって、図8(a)の実験結果などでは耐圧がほとんど落ちてないことから、少なくとも各水滴は7mm以上離れているものと推測される。

以上の結果から、FOVを左右するのは電極間におけるギャップの長さである。同じ長さのギャップでは断続より連続の方がFOVは高い。

含ませるのであるが、濾紙面積に対して水量が多いと、図12に示すように、高電圧印加の際に水が濾紙から移動してしまいFOVが低く測定されたので、濾紙面積に対する水量の比を一定とした。実験に使用した比は水量が $80\mu\text{L}$ で面積は 113mm^2 である。つまり、濾紙の面積に対する水量の比は $0.71\mu\text{L}/\text{mm}^2$ である。

SR表面上の水滴の振舞いを模擬して配置した様子を図11(b)に示す。水滴が4個に分かれたと仮定して、濾紙と濾紙の距離 d を変化させた。なお、4水滴の電極間に占める長さ L は5cm一定とした。これは d の変化によるFOVの影響を調べることが目的であるからである。水量に対する濾紙面積の比は1つ当たり1.17であって、水が印加電界によって濾紙外部に出ていくことはない。

5. 2 実験結果と検討

実験結果は図13(a)および(b)である。FOVの測定は5回測定が行われ、その平均値が黒丸で示してある。黒丸を貫くバーはその上限と下限を示している。タイル上の水滴を模擬した配置図11(a)に対応した実験では、図13(a)に示すようにFOVは電極に濾紙が近くなるほど低くなるのがわかる。これは、電極間にある濾紙では電位の負担が小さく、濾紙先端から電極付近までのギャップで印加電圧のほとんどを負担しているため、ギャップが小さくなるほどFOVが低い。

また、SR上を模擬した配置図11(b)に対応した実験では、図13(b)に示すように各濾紙（水滴）の間隔が7mmを超えたあたりからは電極間に何も無いときのFOVと同等になるのがわかる。タイル上のときと同時に、 d が大きくなると電極間でのギャップの和が大きくなるため、それぞれのギャップでの電圧負担を考慮すると説明がつく。ただし、このように断続的な場合のギャップ和では、同値の連続ギャップのFOVと比べると低い。

6. ま と め

これまでの実験から以下のようなことがわかった。

- 1) タイル上とSR上では電界中の水滴の振舞いは異なる。
- 2) タイルはその表面に一様に水滴が広がるため、FOVは著しく低下する。
- 3) SRはその撥水性が高いため、断続ギャップを生じ、かつ適当な各水滴間隔をもつのでFOVの低下を制御するのに有効である。

ここまでの研究では、SRの高分子碍子の方が磁器碍子より電気的性能は優れている。しかし、実際の野外に配置される碍子は雨天等の際、表面に無数の水滴が付着する。また、今回の実験では一定割合で昇圧したが、実際の送電線などで使用されている碍子は一定電圧を課電しているなど、必ずしも現実を想定していなかった点が幾つか指摘されるよう、今後はこれらの克服に努めて研究を進めていきたい。