

Fig. 1 Charging, discharging and measuring circuit

ンサを充電し、コンデンサの電圧が徐々に高くなって、ある電圧で放電を発生する。そのときの電圧を測定し、電極間隙長と放電を発生した電圧との関係を求める。

Fig. 1に充放電回路と測定回路を示す。放電回路は、回路にスイッチを用いないので電極部を収納した発火箱内に設置した。放電回路の全長は約30cmである。直流高電圧電源は菊水電子工業(株)のPHS 35K-3(0~35kV)を使用した。コンデンサは村田製作所(株)のセラミックコンデンサ、抵抗は充電抵抗、直列抵抗とも、多摩電気工業(株)の高電圧抵抗(PHSタイプ)である。電極間電圧は、岩通電子(株)の高電圧プローブHV-P 30(入力抵抗100M $\Omega$ , 応答周波数帯域DC~30 MHz)を用いて、波形解析装置DATA-6100(Analogic Co., Ltd.)に記録し、放電発生直前の電圧(以後放電開始電圧という)を読みとった。

### 2.3 実験条件

充電抵抗が10M $\Omega$ と100M $\Omega$ , コンデンサ容量が280 pF, 500 pF及び1000 pF, 上部電極が針電極と棒電極, 電極間隙が空気およびアルミナ(西尾工業(株)製, 平均粒度; 3  $\mu$ m), 電圧極性マイナスの場合について実験した。

## 3. 実験結果

### 3.1 充電法における充放電波形

針-平面電極, 空気間隙, 充電抵抗100M $\Omega$ , コンデンサ容量1000 pF, 電極間隙長2 mm, 直列抵抗10k $\Omega$ , 電源電圧15 kVのときの充放電波形をFig. 2に示す。これは4回の同一条件で得られた波形を重ね書きしたものである。放電を発生するまでの充電波形は全く重なっているが、図中に矢印で示した放電の発生時間とその直前の電圧(放電開始電圧)は実験毎に異なっている。

当実験では、充電回路は放電回路に接続したままである。したがって放電が終了するとすぐにコンデンサへの再充電が始まり、そしてある電圧で再度放電を発生し、普通には以下充放電過程を繰り返し持続放電と

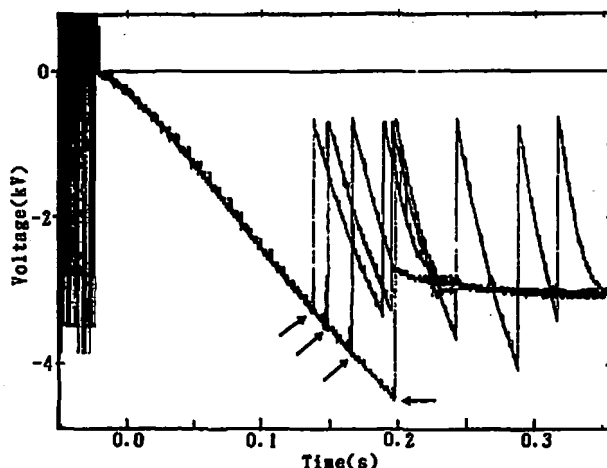


Fig. 2 Typical charging and discharging waveforms (multiple recording with 4 experiments)

なる場合が多い。充放電波形で、2回目以後の充電波形はほぼCRタイプの形状で、充電時間が50 msかそれ以下であるのに対して、1回目の波形はCR充電波形とは大きく異なり、充電時間は0.12~0.22sの長い時間となっている。この時間は電源電圧が高くなるにつれて短くなるが、充電抵抗によっては大きくは変化しない。また2回目以後の充電時間は一定ではなくだんだんと短くなっている。放電開始電圧は1回目と2回目, またそれ以後ではそれぞれに異なっており、さらにそれらは実験毎に異なった。

### 3.2 同一条件での繰り返し試験

Fig. 2の実験と同じ試験回路で、電源電圧25 kV, 電極間隙長2 mmで、一定の試験条件における放電開始電圧のばらつきを調べるために、1回毎に針を交換し、かつ電極面をみがいた場合と、実験の間は電極部に全く触れなかった場合について、1シリーズ10回の試験をそれぞれ10シリーズ行い比較した。

毎回電極を新鮮にしたとき、平均放電開始電圧は3465~5328 V, 標準偏差の範囲は492~942 V, 電極にふれなかったときは、平均放電開始電圧は3030~5028 V, 標準偏差の範囲は376~827 Vであった。また毎回電極を新鮮にしたときの二番目の放電の平均放電開始電圧および標準偏差も同程度であった。この他に、持続放電を生じた場合の10回目までの放電の平均放電開始電圧の標準偏差も同程度であった。

このように平均放電開始電圧および標準偏差とも広い範囲にわたっており、それらの範囲は電極状態によらずほぼ重複している。それら間で本質的な差異はないと判断される。

針-平面電極, 空気間隙, 充電抵抗100M $\Omega$ , コンデンサ容量1000 pF, 直列抵抗10k $\Omega$ の試験条件で、電極間隙長0.5~4.5 mm, 電源電圧10~25 kVで、1シリー

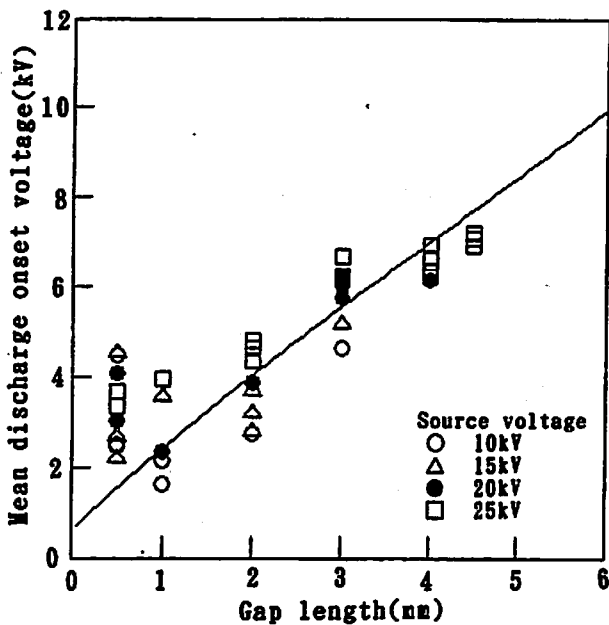


Fig. 3 Relation of mean discharge onset voltage to gap length in repeated test on needle-plate electrodes with air gap

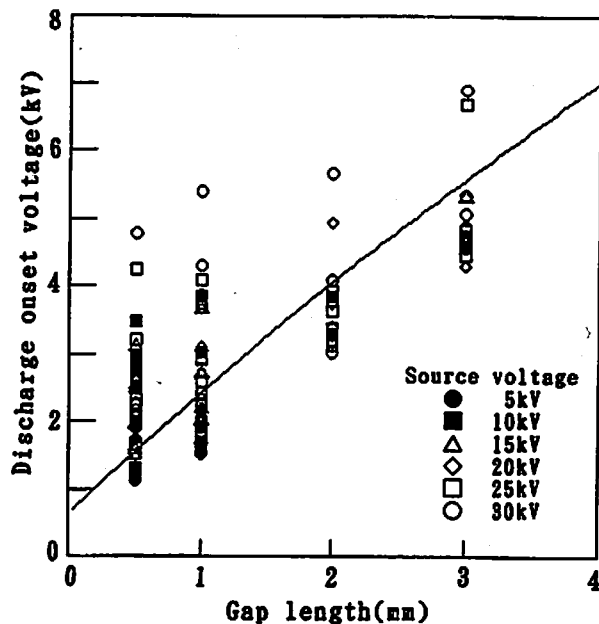


Fig. 4 Relation of discharge onset voltage to gap length in individual test on needle-plate electrodes with air gap

ズ10回の繰り返し試験を行った。電極間隙長と平均放電開始電圧の関係をFig. 3に示す。各試験条件におけるシリーズ数は放電を発生しない場合があるので同じではない。図中の曲線は電極間隙長変化法で得られた印加電圧-50%放電開始電極間隙長の関係である(以下の図でも同じ曲線を示す)。電極間隙長が長くなると、低い電源電圧では放電を発生しない。

ここに、電極間隙長0.5mmのときを除くと、電極間隙長が長く、電源電圧が高くなるにつれて、放電開始電圧は高くなる傾向が認められる。ただ電極間隙長1.0~3.0mmの場合は放電開始電圧が大きくばらついている。また電極間隙長0.5mmのときは大きく不規則であるがそのときを除けば、電源電圧の高い方が規則的ではないが放電開始電圧が高くなっている場合が多い。

これらの1シリーズ10回の試験の放電開始電圧の標準偏差は225~985Vと大きな値となった。これらのうち電源電圧が低く、放電開始電圧がその下限界に近かったときには標準偏差は小さくなった。そのとき以外は、標準偏差の大きさは電極間隙長や電源電圧とはほとんど関係がなかった。

### 3.3 針-平面電極、空気間隙の個別試験と継続試験

充電抵抗100M $\Omega$ 、コンデンサ容量1000pF、直列抵抗10k $\Omega$ で、電極間隙長0.5、1.0、2.0、3.0mmにおいて、それぞれ5~30kV(5kV間隔)の電源電圧で、一つの条件につき9回の試験を行った。この試験を個別試験と呼ぶ。この場合に少なくとも3回に1回は針を交換し、かつ電極部は毎回きれいにみがいた。得ら

れた電極間隙長と放電開始電圧の関係をFig. 4に示す。

次にある一定の初期電極間隙長に設定し、電源電圧を5kV間隔で放電を発生した電圧から25kVまたは30kVまで各1回づつ順次試験し、引き続きその電源電圧のもとで、電極間隙長を順次0.5mmづつ長くして放電を発生する範囲の電極間隙長について各1回づつ試験した。この試験を継続試験と呼ぶ。このとき1シリーズの試験の間、電極部には全く触れなかった。

この継続試験を、充電時定数と電源電圧の放電開始電圧への影響を調べるために、充電抵抗100M $\Omega$ 、コンデンサ容量1000pF、直列抵抗100k $\Omega$ 、電源電圧5~25kVの場合と、充電抵抗10M $\Omega$ 、コンデンサ容量500pF、直列抵抗100k $\Omega$ 、電源電圧5~30kVの場合について行った。後者の場合の電極間隙長と放電開始電圧の関係をFig. 5に示す。電極間隙長と放電開始電圧の関係には大ききなばらつきが認められる。充電抵抗100M $\Omega$ の場合もプロット位置とばらつきはほぼ同様で、充電抵抗による放電開始電圧の違いは認められなかった。

### 3.4 棒-平面電極、空気間隙の個別試験と継続試験

棒-平面電極について3種類の実験で得られた電極間隙長と平均放電開始電圧の関係をFig. 6に示す。一つは充電抵抗10M $\Omega$ 、コンデンサ容量280pFの回路で、直列抵抗10k $\Omega$ 、電極間隙長を0.15~4.0mmとして、電源電圧を電極間隙長が短いときの2kVから長いときの10kVまで順次適当に変えて試験した(Fig. 6A)。次いで電源電圧を8kV一定とし、直列抵抗な

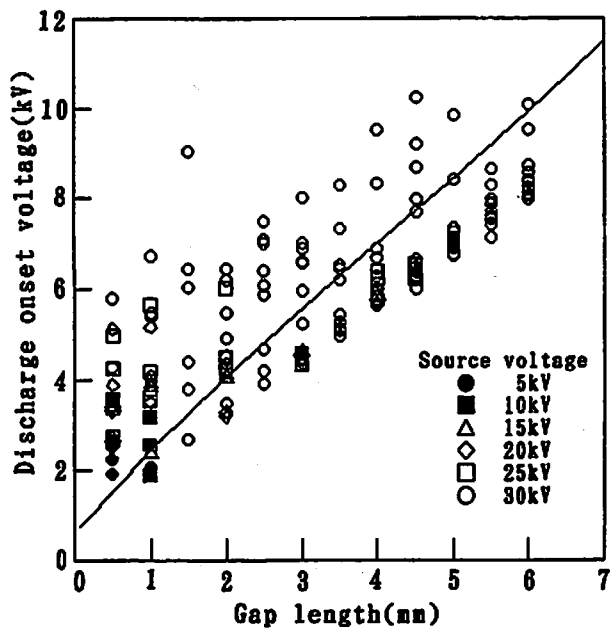


Fig. 5 Relation of discharge onset voltage to gap length in continuous test on needle-plate electrodes with air gap

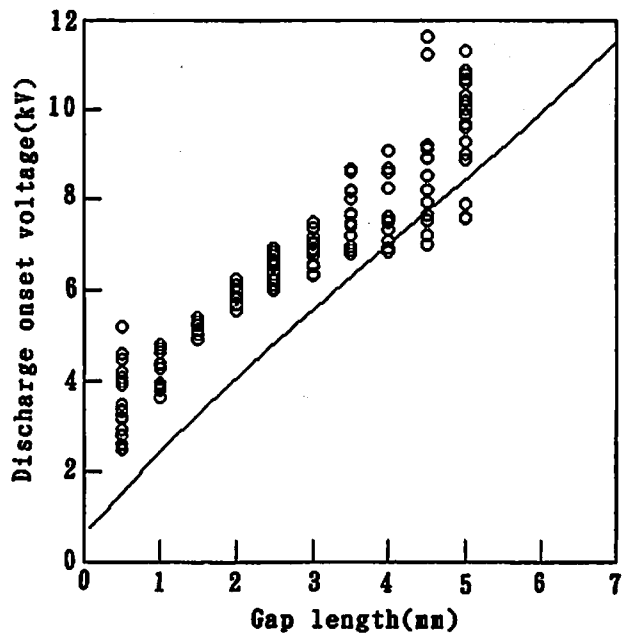


Fig. 7 Relation of discharge onset voltage to gap length in individual test on rod-plate electrodes with air gap

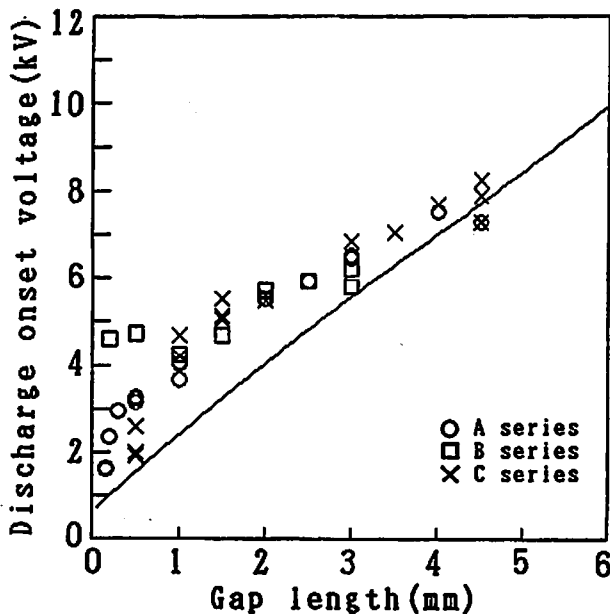


Fig. 6 Relation of mean discharge onset voltage to gap length in repeated test on rod-plate electrodes with air gap

し、電極間隙長を0.2~3.0mm間で試験した(B)。他の一つは充電抵抗100M $\Omega$ 、コンデンサ容量1000pF、直列抵抗100k $\Omega$ 、電源電圧5~25kVで試験した(C)。これらはそれぞれの条件で各10回試験した。

Fig. 3の場合よりも、広範囲の試験条件で得られた結果であるが、電極間隙長1.0~3.0mmにわたって、平均放電開始電圧のばらつきは針-平面電極の場合に

比べて小さく、また棒-平面電極の方が凸状に高い放電開始電圧となっていることがわかる。

棒-平面電極の場合についても、充電抵抗100M $\Omega$ 、コンデンサ容量1000pF、直列抵抗100k $\Omega$ 、電源電圧5~25kVで、個別試験を行った。結果をFig. 7に示す。電極間隙長1.0~3.0mmでは放電開始電圧のばらつきが少なく、かつ放電開始電圧の高い方に大きく膨らんでいることがわかる。

### 3.5 針-平面電極、アルミナ試料の継続試験

Fig. 8には、針-平面電極、充電抵抗100M $\Omega$ 、コンデンサ容量1000pF、直列抵抗10k $\Omega$ 、電源電圧5~25kVで、電極間隙にアルミナ試料を置いた場合の継続試験で得られた電極間隙長-放電開始電圧の関係を示す。Fig. 5の空気間隙の場合の継続試験の結果とはデータの集中位置とばらつきが異なっている。

## 4. 考察

電極間隙長変化法による針-平面電極のときの印加電圧-50%放電開始電極間隙長の関係において、ある一つの安定な関係から別の安定な関係に移る転移現象はいくらか認められたが<sup>2)</sup>、ほとんどの場合に、印加電圧-放電開始電極間隙長の関係は、その標準偏差が0.1~0.2mm以下と小さく、明確に定まった<sup>2)</sup>。

それに対してFig. 3~5の充電法による針-平面電極の場合は、放電開始電圧は大きくばらついている。電源電圧、充電抵抗、コンデンサ容量、直列抵抗、電極等の試験条件が同一であっても、放電開始電圧はほとんどの場合に大きくばらついた。このように放電開

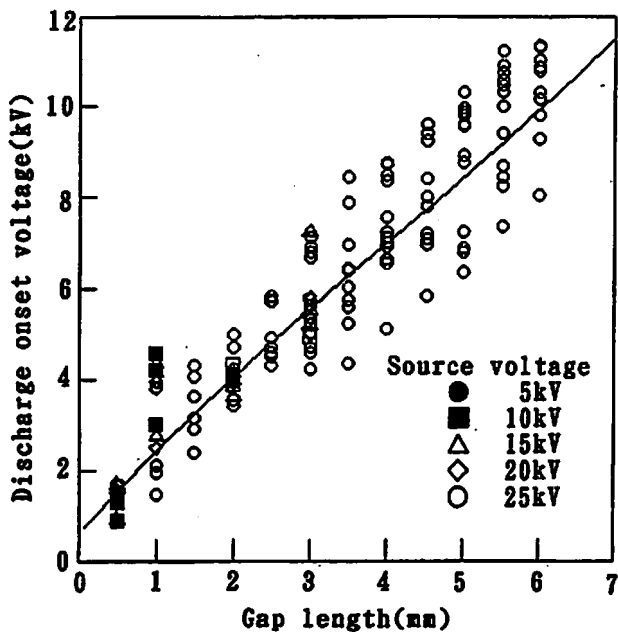


Fig. 8 Relation of discharge onset voltage to gap length in continuous test on needle-plate electrodes with alumina

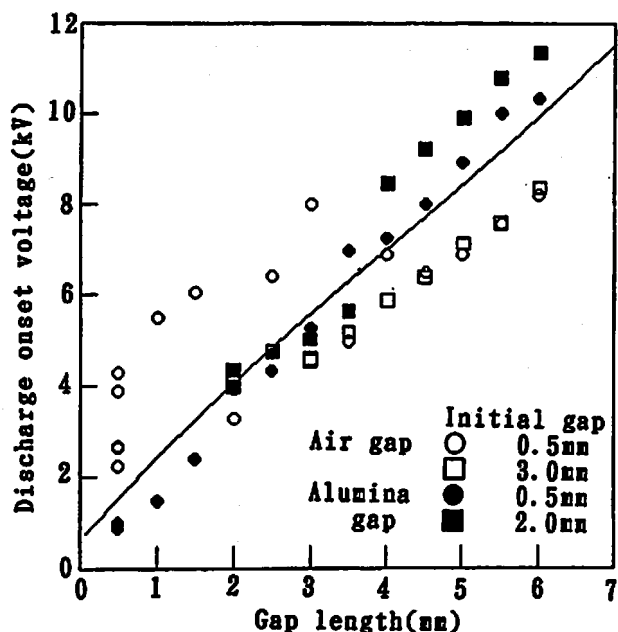


Fig. 9 Relations of discharge onset voltage to gap length in continuous test on needle-plate electrodes with air gap and alumina

始電圧は本質的にばらついていると考えられるが、その詳細を調べるといくつかの規則性が認められた。

Fig. 9はFig. 5に示した針-平面電極、継続試験データのうちの二つのシリーズの放電開始電圧の変化状況を示している。初期設定電極間隙長が0.5mmのときは、その電極間隙長において電源電圧が高くなると、放電開始電圧は高くなる傾向を示す場合が多いが、た

だ全く不規則に変化する場合もあった。

電源電圧30kVの試験の後の順次電極間隙長を長くする実験では、放電開始電圧はその高くなった放電開始電圧から、電極間隙長が長くなるにつれて、さらに高くなる傾向を示している。初期のある設定電極間隙長で、電源電圧につれて放電開始電圧が高くなったものほど、次の電極間隙長変化実験で、高い放電開始電圧や不規則な変化を示すものが多い。これらの不規則変化は、電極間隙長が長くなると急に転移して、下限値の変化に一致するようになる。

ほとんどの条件で以上のような変化が認められたが、電極間隙長3.0mmのときは、Fig. 9に示すように初期設定電極間隙長で電源電圧を高くしても、放電開始電圧は一定で、その後の電極間隙長を長くする実験では下限の放電開始電圧と一致し、放電開始電圧は電極間隙長につれて規則的に高くなった。このようなことから、下限近くのデータは一つの安定な状態のときの電極間隙長-放電開始電圧の関係とみることができる。

Fig. 4及び5で、放電開始電圧の全体的なばらつきをみると、放電開始電圧には上限界と下限界があって、電極間隙長が長くなるにつれてその両方ともだんだん高くなるが、下限界の方がより傾きが大きいので、それらの間の差はだんだんと小さくなる。しかも放電開始電圧の下限界はすべての電源電圧でほぼ共通であるが、上限界は電源電圧が低いと低い電圧範囲にあり、電源電圧が高くなるにつれてだんだん高い電圧の方に移っていることがわかる。

このことは、ある電極間隙長において電源電圧が低くなるにつれて、また一定電源電圧では電極間隙長が長くなるにつれて、放電開始電圧の上限界と下限界の差は小さくなり、つまりばらつきが小さくなり、ほぼ一定値を示すようになるといえる。その小さいばらつきないし一致したところの電極間隙長-放電開始電圧の関係が、Fig. 4および5の下限界近くのデータであり、これは電源電圧が電極間隙に放電開始電圧の下限に近い電圧を与えたときに生じる。これは電極間隙長変化法で得られた印加電圧-50%放電開始電極間隙長の関係よりも、放電を発生しやすい側にある。

つぎに放電開始電圧の電源電圧に対する比(電源電圧比と呼ぶことにする)を検討する。針-平面電極系、空気間隙、充電抵抗が10M $\Omega$ と100M $\Omega$ のときの継続試験と、充電抵抗が100M $\Omega$ のときの個別試験の場合について、電極間隙長と電源電圧比の関係をFig.10に示す。電源電圧比は、電極間隙長が短いときは0.05~0.5の範囲にあるが、電極間隙長が長くなるにつれてその範囲はだんだんと狭くなり、0.25~0.3に漸近している。電源電圧比は充電抵抗によらず、かつその

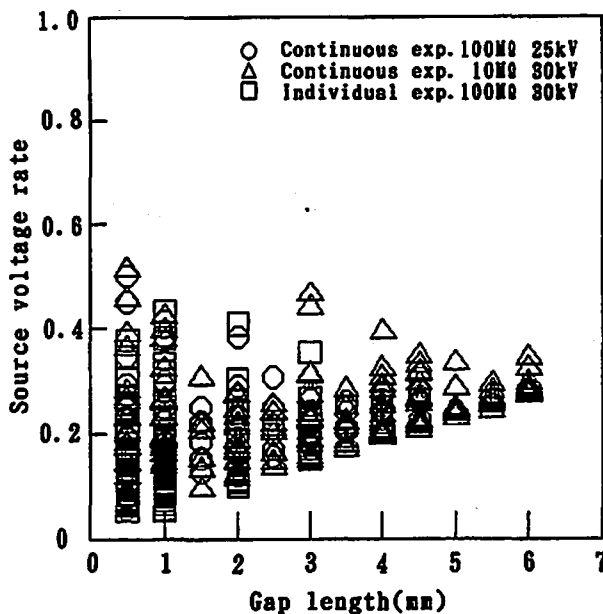


Fig. 10 Relation of source voltage rate to gap length on needle-plate electrodes with air gap

ばらつき範囲は限定されており、低い比側に集中し高い比側にあるものは継続試験のデータが多い。

電極間隙長—電源電圧比の関係を、放電開始電圧のコンデンサに最大に充電されたときの電圧に対する比（以下充電電圧比と呼ぶ）の関係に変換するには、充電抵抗10MΩのときは、Fig.10の縦軸目盛を11/10倍、100MΩのときは2倍すればよい。電源電圧比は充電抵抗によって変わらないので、10MΩの方が電極間隙長が長くなるほど低い充電電圧比となることがわかる。このことは、充電抵抗10MΩの方が、100MΩのときよりも充電過程の早い段階で放電を発生すること、電圧の立ち上がり方が速い方がより早く放電を発生することを示している。

棒—平面電極の場合の放電開始電圧は、棒電極の直径と等しい電極間隙長前後では、針—平面電極の場合とは大きく異なって、棒電極の方は低い放電開始電圧となっているものがなく、かつばらつきが小さいことがわかる。

すなわち、棒電極の直径の0.5～2倍の長さの電極間隙長範囲にわたって、放電開始電圧は、針電極の場合に比べて凸状に高くなっており、その間の標準偏差は250V以下と小さく、そのうちでも25～150Vのものが多い。この範囲はほぼ平等電界を生じていると考えられる。電極間隙長3.5mmを越えるとだんだんとばらつきが大きくなり、4.0mm以上では針—平面電極の場合よりもばらつきが大きくなり、また標準偏差も大きくなる場合がある。これは棒電極の直径に比べて電極間隙長が長くなり、針電極とみなせるようになるた

めと考えられる。一方電極間隙長の短い0.5と1.0mmでは、ばらつきが大きくなっている。理由は不明である。

針—平面電極系、アルミナ試料中での放電開始電圧の分布は、Fig. 8に示されるように空気間隙の場合と同じく大きなばらつきが認められた。ただそのばらつきの様子は異なっており、電極間隙長の短い方の放電開始電圧のばらつきよりも、電極間隙長の長い方がばらつきが大きくなっている。

放電開始電圧の変化状況の詳細をみるために、Fig. 8の中の二つのシリーズの放電開始電圧の変化もFig. 9に示した。この場合には、初期設定の電極間隙長のもとで、電源電圧を変化させたときに、電極間隙長0.5および2.0mmのときも、放電開始電圧はほとんど一定か、わずかしき変化せず、引き続いた電極間隙長を変化させる試験では、電極間隙長が長くなるにつれて、放電開始電圧は高くなっていくが、必ずしも規則的ではない。そして空気間隙の場合のように明確に定まる電極間隙長—放電開始電圧の関係が存在していない。放電開始電圧は、電極間隙長変化法による針—平面電極、空気間隙のときの印加電圧—放電開始電極間隙長の関係よりも高い電圧側にあったり、低い電圧側にあったりして一定していないが、平均値ではほぼ同じである。この場合には途中で転移現象を示す場合が多い。これらがFig. 8の電極間隙長の長いところにおけるプロットの広がりの原因となっている。

針—平面電極、空気間隙の場合には、Fig. 4と5に示されるように、放電開始電圧のばらつきが大きく、さらにFig. 4の個別試験の場合よりも、Fig. 5の継続試験の方がばらつきが大きくなり、放電電圧の高いものが多くなっている。ばらつきは二つに分けられると考えられる。一つは充電法で特別な条件にない限り普通に生じるばらつきで、他の一つは電極表面が変化して、放電開始電圧が高くなる場合である。

充電法、針—平面電極、空気間隙で普通に生じるばらつきは、電極間隙長と電源電圧で決まる範囲にある。他のばらつきは継続試験のときに生じた高い放電開始電圧や、棒—平面電極の電極間隙長0.5と1.0mmのときのばらつきで、これは電極表面の変化、いわゆる不整現象<sup>9),10)</sup>で生じたものと考えられる。この場合は、不整現象が生じれば突然に別の放電開始電圧に変化し、その後その状態を維持し、そして突然にもとの放電開始電圧または他の別の放電開始電圧に変化する。このような突然の放電開始電圧の変化を転移現象と呼んでいる。これは、Fig. 9に示されている現象にみられ、また棒—平面電極の短い電極間隙長における同一条件での繰り返し実験のときにしばしば認められた。この

不整現象は普通のばらつきの範囲内でも生じていると考えられる。

電極間隙に粉体試料がある場合には、もっとしばしば不整現象が起こっているが、空気間隙のときのように、その状態が安定な状態では維持されないために、小さい転移現象が数多く生じたと考えられる。

実用の静電気感度試験の電気回路としては使用されていないが、充電法では放電開始現象は大きくばらつくことがわかった。針-平面電極、空気間隙、棒-平面電極、空気間隙、および針-平面電極、アルミナ間隙のときは、明確に放電開始電圧が定まる領域とばらつきはそれぞれに異なった。これらのことは静電気感度試験、静電気放電発生実験、そして実際の静電気発生現場で、静電気放電開始現象を検討するときに考慮する必要がある。

#### 5. まとめ

- 1) 充電法では、針-平面電極、空気間隙のときは放電開始電圧は大きくばらつく。一定電極間隙長では電源電圧が低くなるにつれて、また一定電源電圧では電極間隙長が長くなるにつれて、放電開始電圧の上限界と下限界の差は小さくなり、つまりばらつきの範囲は狭くなる。
- 2) 一つの明確に定まる電極間隙長-放電開始電圧の関係は、電源電圧が電極間隙に放電開始電圧の下限界に近い電圧を与えたときに得られ、その関係は電極間隙長変化法で得られた印加電圧-放電開始電極間隙長の関係よりも放電を発生しやすい側にある。
- 3) 棒-平面電極、空気間隙のときは、電極間隙長が棒電極の直径の0.5~2倍の長さの範囲にわたって、放電開始電圧は針-平面電極の場合よりも高くなり、標準偏差は小さい。ただ電極間隙長の短いところと長いところでは、放電開始電圧は電圧

の高い方に大きくばらつく。

- 4) 針-平面電極、アルミナ間隙のときは、電極間隙長が長くなるにつれてばらつきが大きくなり、明確に定まる電極間隙長-放電開始電圧の関係を示さない。平均的にみれば電極間隙長変化法の空気間隙のときの印加電圧-放電開始電極間隙長の関係に近い。
- 5) 放電開始電圧のばらつきには、普通に生じる限られた範囲内のばらつきと、偶発的に生じる不整現象によるばらつきがあり、継続試験、棒-平面電極の短い電極間隙長及びアルミナ間隙の場合は後者のばらつきによると考えられる。

#### 文 献

- 1) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会秋季研究発表講演会要旨 平成6年10月, P.9 (1993)
- 2) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 55, 214 (1994)
- 3) 黒田英司, 永石俊幸, 工業火薬協会1993年度年会講演要旨集, P.67 (1993)
- 4) B. Lewis and G. von Elbe, "Combustion, Flames and Explosions of Gases" 2nd edition, Academic Press, P.323 (1961)
- 5) 黒田英司, 永石俊幸, 静電気学会講演論文集'93, P.433 (1993)
- 6) E. Kuroda, T. Nagaishi, Proc. of the 18th Int. Pyrotechnics Seminar, P.511 (1992)
- 7) 電気学会放電専門委員会編, 「放電ハンドブック」, P.95 (1991), 電気学会
- 8) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会1995年度年会講演要旨集, P.131 (1995)
- 9) 静電気学会編, 「静電気ハンドブック」, P.214 (1981), オーム社
- 10) 武田 進, 「気体放電の基礎」, P.81 (1990), 東京電機大学出版局

## Onset of spark discharge in electrostatic sensitivity test (II)

### Measurement of onset voltage of spark discharge by the charging method

by Eishi KURODA\* and Toshiyuki NAGAISHI\*\*

Discharge onset voltage was measured by the charging method. Two pairs of electrodes were used. One is needle-plate electrodes and the other is rod-plate electrodes. The test was carried out under air gap or filled alumina between them. When the source voltage was set around the lower limit of discharge onset voltage with needle-plate electrodes under air gap, the distinct relation between the gap length and the lower limit of discharge onset voltage was recognized. Otherwise discharge onset voltage was very scattered in the range depend on both the gap length and the source voltage. With rod-plate electrodes under air gap of which length 0.5 to 2 times of the rod diameter, discharge onset voltage was higher than with needle-plate electrodes and the standard deviation was small. The distinct relation between the gap length and discharge onset voltage was not recognized in experiments with needle-plate electrodes filled with alumina. The longer the gap length, the larger the scatter was. The scatter was originated from both characteristics of the charging method and fluctuation of the electrode surface.

(\*Shirakawa R&D Center, Nippon Koki Co., Ltd., 2-1 Nagasaka Nishigoh-mura, Nishishirakawa-gun, Fukushima 961, Japan

\*\*Faculty of Engineering, Kyushu Sangyo University, 2-1-3 Matsuka-dai, Higashi-ku, Fukuoka 813, Japan)