



静電気感度試験における火花放電開始現象

黒田英司*, 永石俊幸**

接近電極装置における火花放電開始現象を、統計的手法によって検討した。針-金属平面電極と針-導電ゴム電極系で、空気間隙の場合は、容量や直列抵抗によらず、それぞれほぼ一定の印加電圧-50%放電開始電極間隙長関係を示し、印加電圧が高くなると、前者の方が放電を発生しやすくなった。容量や直列抵抗は逸脱やばらつきに影響した。また実験結果と平行平板金属電極系に対するPaschenの電極間隙長-放電開始電圧関係間の違いが明らかになった。

1. まえがき

非常に鋭感な物質の静電気感度試験や高い容量のコンデンサを使用して静電気感度試験を行うときには、放電の発生の有無が得られる感度値に大きく影響する場合がある¹⁾。一方、火工品原料取扱い現場で静電気放電が発生しなければ、静電気発火が生じることはない。また静電気放電が発生したとしても、そのときの電極間隙長が、対象物質の最も発火しやすい電極間隙長から大きく離れている場合には、その物質の発火の確率は非常に低くなるはずである^{1),2)}。

このように、放電の発生の有無や放電が発生したときの電極間隙長は、静電気感度試験や静電気発火と関係して非常に重要な問題と考えられる。これらに関して基礎的知見を得るために、静電気感度試験装置を使用して、静電気放電開始現象を検討した。

ここでは、静電気放電開始現象を接近電極装置を使用して、針-金属平面電極と鋭感な物質の静電気感度試験のときに問題となる針-導電ゴム電極^{3),4)}について、電極間隙長変化法によって測定した結果について検討する。

2. 静電気放電の発生と試験方法

静電気放電が発生する代表的な状況として、次の三

つが考えられる。

- 1) ある帯電物体が、接地状態にある導体に接近していき、ある限界距離のところで、放電を発生する。
- 2) 接地状態にある導体の近傍にある物体の電圧が放電開始電圧以上に急激に高くなって、放電を発生する。
- 3) 接地状態にある導体の近傍にある物体の電圧が徐々に高くなり、放電発生電圧に到達して放電を発生する。

このような放電の発生の限界条件を測定する方法として、1)については電極間隙長変化法、2)については電圧変化法、3)については充電法⁵⁾が考えられる。ここに電極間隙長変化法とは、接近電極装置で、一定のコンデンサ充電電圧のもとで、最接近の電極間隙長をDixon法に基づいて長短変化させて、放電発生の限界電極間隙長を測定する方法である。電圧変化法とは、固定間隙装置で一定の設定電極間隙長のもとで、印加電圧(コンデンサ充電電圧)をDixon法に基づいて高低変化させて、放電発生の限界電圧を測定する方法である。充電法とは、固定間隙装置で、一定の設定電極間隙長のもとで、コンデンサに徐々に充電して電圧を高めていき、放電を発生する限界電圧を測定する方法である。

3. 実験

3.1 静電気感度試験装置

電極間隙長変化法による試験には、接近電極装置を使用した。接近電極装置とは、一定の充電電圧に充電したコンデンサに接続した上部電極が、急速に下部電極に接近していき、ある一定の設定した最接近の電極

1994年7月25日受理

*日本工機株式会社白河研究所

〒961 福島県西白河郡西郷村長坂土生2-1

TEL 0248-22-3802

FAX 0248-22-4252

**九州産業大学工学部

〒813 福岡市東区松香台2-3-1

TEL 092-673-5655

FAX 092-673-5699

間隙長になった後は、急速に元の位置に戻る装置である。上部電極はスチールレコード針、下部電極は直径20mmのステンレス棒の頂部平坦面である。

上部電極の移動は、制御装置によって遠隔操作できるパルスモータを使用することによって行った。制御装置によって、電極の位置を1/100mm単位で設定でき、かつ移動形態（急速接近、減速、静止、加速、定速分離）とそれらの速度または時間を予めプログラミングすることができる。

接近していくときの速度は21cm/s、最も接近した位置に達する前に急速に速度を減じ、最も接近した位置で静止、0.2秒間静止したのちは6.7cm/sの速度で上部電極は下部電極から離れて元の位置に戻る。

高電圧直流電源は菊水電子工業(株)のPHS35K-3形を使用した。コンデンサは村田製作所(株)のセラミックコンデンサとニチコン(株)のオイルコンデンサを使用した。充電用抵抗はほとんどの実験では10M Ω とした。

3.2 主な実験条件

次のような実験条件について実験を行った。

電極：上部電極は全てスチールレコード針の針電極、下部電極は棒の頂面を使用した金属平面電極及びその上に導電ゴムを置いた導電ゴム電極。導電ゴムはシンド静電気(株)より入手した、ゴムにカーボンブラックを混入したタイプのもので、厚さ2mm、表面固有抵抗3.5M Ω である。これを10 \times 10mmに切断して、金属電極平坦面上に載せて一方の電極とした。

コンデンサ容量：200pFと1000pF

直列抵抗：なし、5k Ω 、30k Ω 及び100k Ω

電極間隙間の状態：ほとんどは空気間隙、粉体試料としてアルミナ（西尾工業(株)）を置いた実験も行った。

3.3 結果の判定

容量が低くて、高い直列抵抗の場合には、放電が発生しても音や光を発生せず、放電が生じたかどうかを判定することが困難である。そのために波形解析装置DATA-6100(Analogic Co., Ltd.製)を使用して、放電波形を観察し、その波形形状によって放電発生の有無を判定した。なお電圧測定用プローブはHV-P30(岩通電子(株)、入力抵抗：100M Ω)を使用している。印加電圧、すなわちコンデンサ充電電圧は充電用抵抗10M Ω を使用したときは電源電圧の約10/11となる。

3.4 統計処理方法

放電の発生は確率現象である。そのために、統計処理方法としてDixon法^{6),7)}を使用し、試験回数50~80回で50%放電開始電極間隙長と標準偏差を決定した。

4. 実験結果と検討

4.1 予備検討

いくつかの試験条件のもとで、放電の発生確率分布が正規分布となるかどうかを調べるために、Probit法⁸⁾による試験を行い、その結果について χ^2 検定⁹⁾を行った。その結果5%危険率で正規分布と判定される場合と正規分布ではないと判定される場合があった。後者の場合には、異常に放電の発生が続いたり、逆に異常に放電の発生がない場合が続いたためである。このような異常現象が生じていないときは、ほとんど全て正規分布であると判定された。

これらの解析のときに、横軸の電極間隙長の目盛を普通目盛とするか対数目盛とするかで、 χ^2 検定結果にほとんど差異は認められなかった。標準偏差は、横軸目盛を普通目盛として解析したときに、低い印加電圧と高い印加電圧のときのデータ解析の結果において、その大きさに変わりがなかった。このことは横軸目盛を普通目盛とすることが妥当であることを示している。いくつかの試験条件のもとで、標準偏差は0.02~0.05mmと非常に小さかった。この結果からDixon法でのup and down試験における水準間隔は0.05mmとした。

4.2 主な試験条件における試験結果

Up and down $\circ\times$ 系列の一例をFig. 1に示す。 \circ 又は \times が分布する水準数は、普通には容量1000pFのときは3~5、容量200pFのときは2~4であるが、それ以上の水準数にわたって分布する場合もあった。Fig. 1は極端な例で、これは針-金属平面電極、容量1000pF、直列抵抗100k Ω 、電源電圧9000Vのときのデータである。このように \circ 又は \times が異常に引き続いて現われる現象は、容量1000pFのときや直列抵抗なし、および30k Ω のときに多く認められた。

このようなup and down $\circ\times$ 系列データをDixon法によって解析し、50%放電開始電極間隙長と標準偏差を求めた。Fig. 2と3は針-金属平面電極、Fig. 4と5は針-導電ゴム電極で、それぞれ1000pFと200pFにおいて、直列抵抗なし、直列抵抗5、30及び100k Ω のときに得られた印加電圧-50%放電開始電極間隙長の関係を示す。これらのデータの詳細を眺めると、直列抵抗によってデータが規則的に逸脱している場合と、不規則に逸脱している場合があり、その逸脱の程度は異なっている。

Fig. 2の針-金属平面電極、1000pFのとき、直列抵抗なしのデータは、印加電圧の低い方では直列抵抗5k Ω のデータと一致し、高い方では30k Ω 及び100k Ω のデータと一致している。追加実験のデータも含めてより多くのデータが含まれた後者の方のデータが正常な状態であると考えられる。

GAP LENGTH

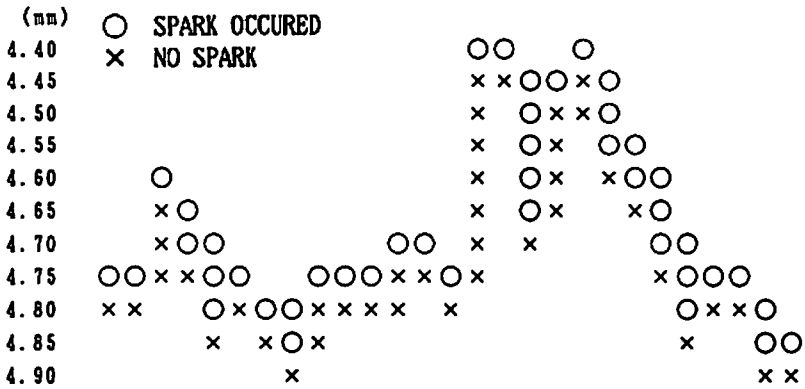


Fig. 1 Up and Down sequence
Needle-plane electrodes, $C=100\text{pF}$, $R=1000\Omega$, $V=9000\text{V}$

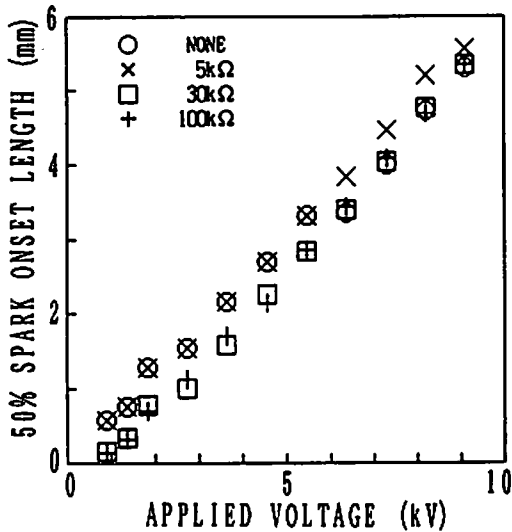


Fig. 2 Applied voltage-gap length of 50% onset of the spark discharge relation
Needle-plane electrodes, $C=1000\text{pF}$

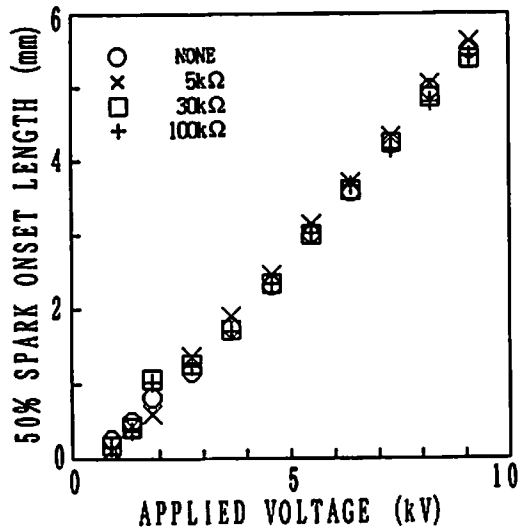


Fig. 3 Applied voltage-gap length of 50% onset of the spark discharge relation
Needle-plane electrodes, $C=200\text{pF}$

このようにある印加電圧を境にして、ある適合カーブから他の適合カーブに移る現象を転移現象と呼ぶことにする。Fig. 2の直列抵抗なしのような大きな転移現象はまれにしか生じないが、わずかな転移現象は他の条件のときのFig. 3~5のデータにも認められる。

Fig. 4の針-導電ゴム電極、1000pFでの直列抵抗30kΩのデータは、大部分は直列抵抗なしと5kΩのデータの間にあるが、部分的に不規則に大きく逸脱したデータがある。このようにある印加電圧のときだけ逸脱するデータも、その程度に違いはあるがかなり認められる。

転移現象や逸脱は、容量1000pF、直列抵抗なしと30kΩのときに多く認められる。印加電圧では、電源電圧

1750~2200V間で比較的に大きな逸脱が認められ、その他針-金属平面電極では電源電圧7750~10000V、針-導電ゴム電極では電源電圧6000~8000Vのときに異常が現われやすい傾向がある。ただこの現象は再現性のある現象ではない。また、転移現象や逸脱の出現は直列抵抗値の高低とは規則的な関係はない。したがって直列抵抗値は、基本的には印加電圧-50%放電開始電極間隙長関係に関係しないと考えられる。

これらの実験で得られた標準偏差で、Fig. 2~5に示したデータで0.2mmを越えたのは、針-金属平面電極、1000pFのときに3個、針-導電ゴム電極、1000pFのときに4個だけで、これらの場合にはFig. 1に示されるように、放電の発生が異常に続いたり、逆に異

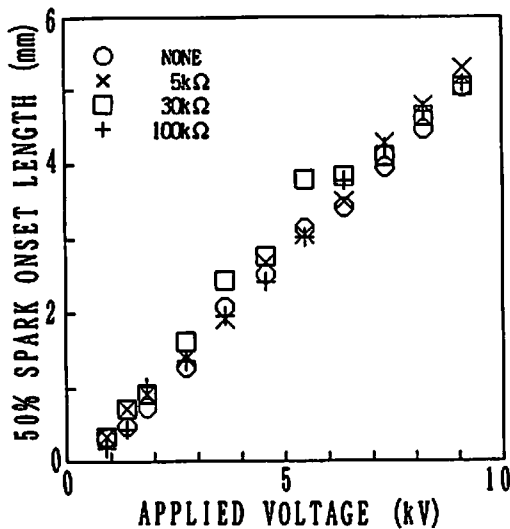


Fig. 4 Applied voltage-gap length of 50% onset of the spark discharge relation Needle-conductive rubber electrodes, $C=1000\text{pF}$

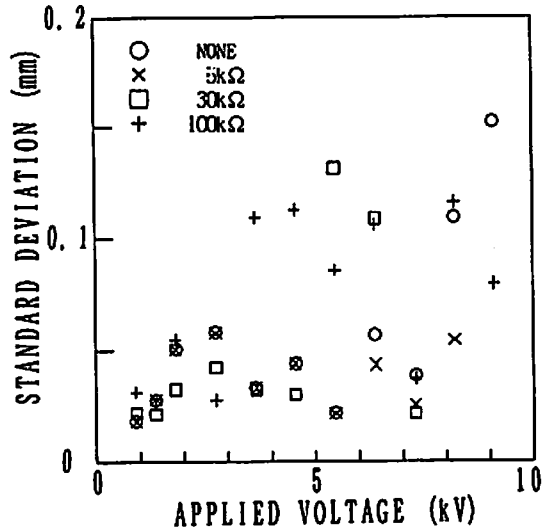


Fig. 6 Standard deviation Needle-plane electrodes, $C=1000\text{pF}$

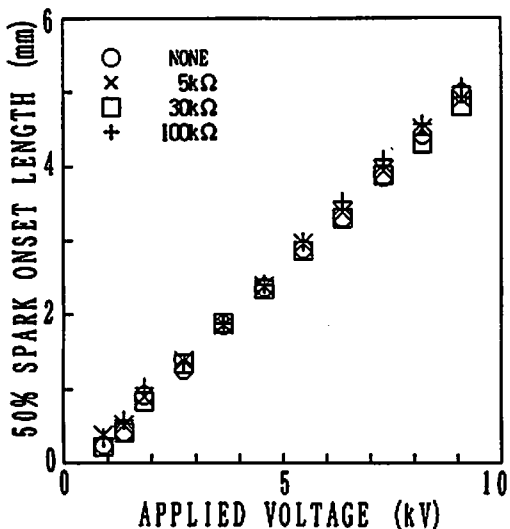


Fig. 5 Applied voltage-gap length of 50% onset of the spark discharge relation Needle-conductive rubber electrodes, $C=200\text{pF}$

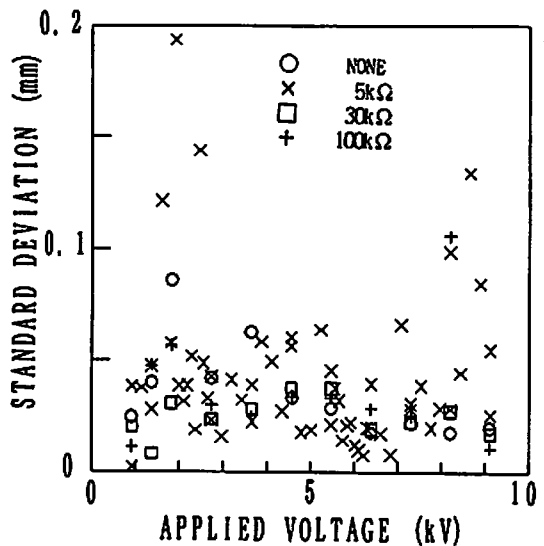


Fig. 7 Standard deviation Needle-plane electrodes, $C=200\text{pF}$

常に放電の発生がないために標準偏差が大となったものである。1000pFのその他のとき及び200pFの全ては標準偏差が0.2mm以下であった。

針-金属平面電極の場合について、1000pFと200pFのときの0.2mm以下の標準偏差の分布をFig. 6と7に示す。なおFig. 7には後述の追加試験のデータも含めてある。標準偏差の90%以上が、1000pFのときは0.02~0.16mm間にあり、それに対して200pFのときは0.01mm

~0.06mmと非常に狭い範囲に分布している。針-導電ゴム電極の場合も1000pF, 200pFのそれぞれについて針-金属平面電極の場合とほぼ同等の標準偏差となった。

4.3 追加実験

Fig. 2~5では、ほとんどが1000Vの電圧間隔で試験を行った。放電開始現象の再現性とその詳細を調べるために、電圧間隔を100V又は250Vとして、多数回の実験を行った。針-金属平面電極200pF, 直列抵抗5kΩの実験結果を、初期実験結果とともにFig. 8に示す。

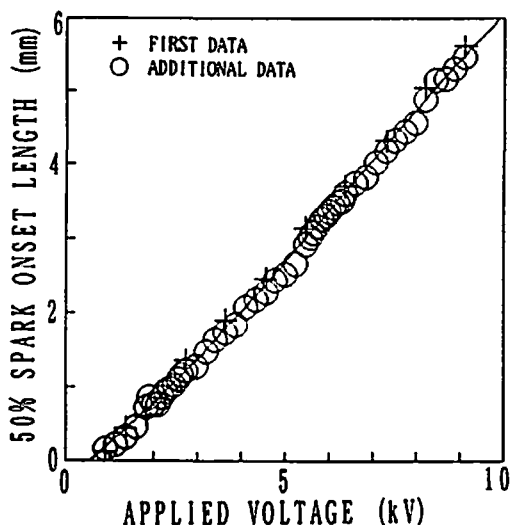


Fig. 8 Applied voltage-gap length of 50% onset of the spark discharge relation Needle-plane electrodes, $C=200\text{pF}$, $R=5\text{k}\Omega$

実線カーブは針-金属平面電極で大きく逸脱したデータを除く全てのデータから最小二乗法で決定したものである。印加電圧につれて、実線カーブから離れるかそれに接近するというように、データが変化していく傾向が認められる。

放電が発生する電極部は、静電気感度試験装置の発火箱内にあり、当実験のときは入口をポリエチレンシートで閉じている。普通放電開始現象の実験を行うときには、乾燥空気発生装置を始動させ、発火箱内に乾燥空気を送り込み、しばらくしてから実験を開始する。

実験は普通には印加電圧の高い方から順次行った。一つの50%放電開始電極間隙長を決定するのに、50~80回の実験を行い、それには1時間以上の時間を必要とする。数シリーズのデータを得るには半日もかかることになる。

その間、発火箱内大気の相対湿度は50%以下であるが、電極面の湿分の状態は変化し、また温度調節は行っていないために、周囲大気と電極の温度は時間の経過につれてかなり変化する。それらの影響によって平均位置からの印加電圧につれての規則的な逸脱が生じたと考えられる。急激に変化している部分があるが、それは実験日が異なったためである。初期のデータに比べて追加の実験データは本質的な差異はないといえる。

このようなことから、Fig. 2~5の個々のデータの印加電圧による変化状況をみると、ある程度規則的な

逸脱が認められる場合があり、それらの場合にも相対湿度と温度の影響があったといえる。

湿度の影響を知るために気温27℃相対湿度70%のときに針-金属平面電極で200pF、直列抵抗なしのときに50%放電開始電極間隙長を測定した。相対湿度50%以下で得られた以前のデータに対して、今回は平均して0.35mmだけ短い50%放電開始電極間隙長が得られ、相対湿度が高いと放電が発生し難くなることが示された。

容量による50%放電開始電極間隙長の違いは、両電極系においてある程度認められた。Fig. 2~5において針-金属平面電極では200pFの方が、また針-導電ゴム電極では1000pFの方が、わずかに放電をしやすい側にプロットされている。

針-金属平面電極で、容量500pFと10nF、直列抵抗なしの場合について追加試験を行った。その結果500pFのデータは、200pFと1000pFの中間にプロットされたが、10nFのデータは、最も放電を発生しやすい側にプロットされた。このように容量と50%放電開始電極間隙長間には規則的な関係はなく、容量による違いは大きくはなく、主として実験環境条件の違いによって生じたと考えられる。

以上のデータは、放電間隙間が空気の場合である。電極間隙間に不活性粉体試料としてアルミナ粉末を置き、容量1000pFで、直列抵抗なしと100kΩの場合について、同様の実験を行った。ただこの場合には、実験毎に試料を載せた下部電極をたたくなどして、実験毎に試料の状態が変わるようにした。得られた印加電圧-50%放電開始電極間隙長関係をFig. 9に示す。実線カーブはFig. 8のものと同じである。いずれの場合も空気間隙の場合に比べて放電の発生しにくい側に、不規則に大きくはずれてプロットされている。またこれらの場合には標準偏差は0.2mm以上のものが約2/3と非常に大きくなった。

4.4 印加電圧-電極間隙長関係

以上の実験で、大きな転移現象を示したデータ及び大きく逸脱したデータを除いた空気間隙の場合のデータについて、最小二乗法によって、印加電圧(V)と50%放電開始電極間隙長(l)の関係式を求めた。容量による違いが認められたので、針-金属平面電極と針-導電ゴム電極系について200pFと1000pFのとき、及び全てのデータの適合カーブをFig. 10に示す。容量による違いは前述のように、実験環境条件によるものである。

針-金属平面電極と針-導電ゴム電極について、最も適当と考えられた関係式は次の通りである。

針-金属平面電極

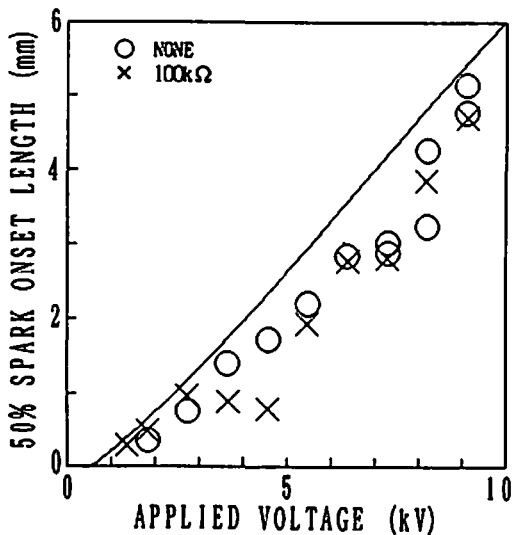


Fig. 9 Applied voltage-gap length of 50% onset of the spark discharge relation in Al_2O_3 sample Needle-plane electrodes, $C=200pF$, $R=100k\Omega$

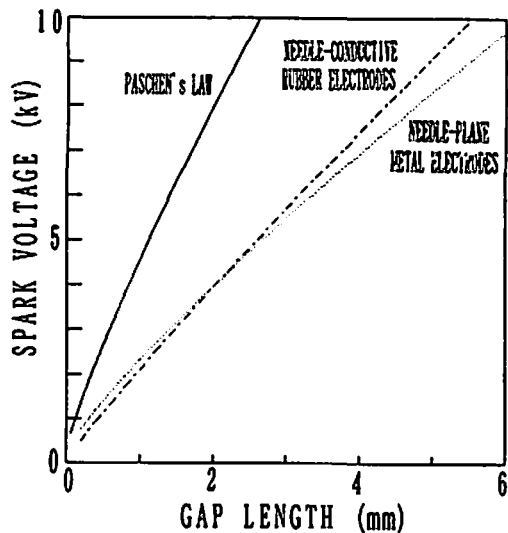


Fig. 11 Gap length-spark onset voltage relation

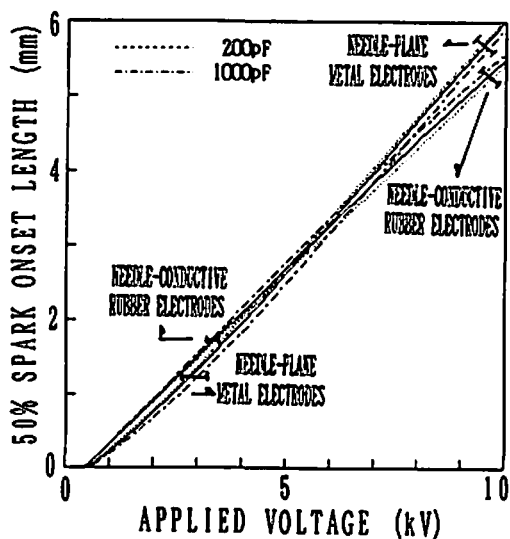


Fig. 10 Applied voltage-gap length of 50% onset of the spark discharge relation by least square method

$$l = -25.02 + 0.04307V + 3.85 \times 10^{-6}V^2 + 1.9 \times 10^{-10}V^3$$

針-導電ゴム電極

$$l = -27.04 + 0.05903V + 0.27 \times 10^{-6}V^2 + 0.4 \times 10^{-10}V^3$$

火花放電の開始条件を表わす法則としては、Paschenの法則^{10)~13)}が良く知られている。Paschenの理論式の係数を、スチール電極、空気中の平等間隙

について $20 < pl < 1000$ (cm-torr) の間で実験的に定めた式として次の武田の式¹⁰⁾が知られている。

$$V_s = 126 \frac{pl}{\log_{10} pl + 0.22}$$

ここに p は大気圧で torr 単位、 l は電極間隙長で cm 単位、 V_s は火花放電開始電圧でボルト単位である。

この武田の式に、針-金属平面電極及び針-導電ゴム電極の大きく逸脱したデータ以外の全てを、それぞれ非線型最小二乗法¹⁴⁾によってあてはめ、係数を決定した。得られた関係式は次の通りである。

針-金属平面電極

$$V_s = 49.1 \frac{pl}{\log_{10} pl + 0.361}$$

針-導電ゴム電極

$$V_s = 97.4 \frac{pl}{\log_{10} pl + 1.617}$$

これらの関係式を Fig. 11 に示す。極小火花電圧は、約 330V として知られているが、武田の式では 475V、針-金属平面電極では 700V、針-導電ゴム電極では 15V となった。ただ電極間隙長が短くなるにつれて、適合カーブは実験値からだんだんと逸脱が大きくなり、その外挿として求めた極小火花電圧は単なる参考値にすぎない。実験データ自体をより厳密に近似しているのは最小二乗法三次式の方である。Paschenの平行平板電極の場合に比べて、針-金属平面電極及び針-導電ゴム電極は、電極間隙長の長いところでは非常に大

きな差があり、放電を発生しやすいが、電極間隙長が短くなるにつれてだんだんと差が小さくなるのがわかる。針-金属平面電極と針-導電ゴム電極系の違いは、実験環境条件による容量による違いとは異なって、印加電圧約6000V以上では針-金属平面電極の方が放電を発生しやすく、それ以下の電圧範囲では針-導電ゴム電極の方が放電を発生しやすくなることを示している。

4.5 実験方法の問題点の検討

当実験は、一シリーズのup and down試験の間は電極系には全く触れることなしに、つまり針の交換や電極面の掃除をすることなしに実験を続行した。当然前の実験の結果が次の実験結果に影響することが考えられ、特に実験の途中で何らかの異常状態が生じると、それに引き続く実験の結果に影響するはずである。

放電開始に関する正確なデータを得るための正規の方法は一回一回針を交換し、一回一回電極表面を新鮮な状態にして実験を行うことであろう。ただこのようにした場合には、新たに電極間隙長の設定誤差や電極表面状態のばらつきが導入され、むしろ標準偏差が大きくなるがあった。そのために、また何よりも実験に要する時間の非常に大きな違いのために、一シリーズの実験の間は、電極系には全く触れることなしに実験を行った。転移現象や大きな逸脱の大部分は、このような実験方法のために、すなわち個々の実験が完全には独立していないことから生じたと考えられる。

逸脱の原因の一つは、コロナ放電の発生によるもので、それが異常に発生しやすくなったときは、up and down試験で、放電発生が何回も引き続いて、極端に長い電極間隙長のところまで生じる。一度その条件がなくなると、今度は何回も引き続いて放電が発生しなくなり、正常なときの電極間隙長に戻り、さらには短い電極間隙長のところまで放電が発生しなくなる。Fig. 1の例はこのようにして生じたもので、異常状態のときは実際に目による観察によってコロナ放電の発生が認められた。

このようなコロナ放電が異常に発生しやすくなる現象として不整現象¹³⁾が知られているが、そのような現象が偶然発生し、また偶然に消滅したものと考えられる。データの逸脱は放電の発生しやすい側に多く認められる。

転移現象や大きな逸脱は、このような原因で生じたものであり、それが生じやすい条件はいくつか認められたがその条件のときであっても、発生するか否かは偶然的である。同じ実験で繰り返し実験を行ったときに起きる場合と起きない場合とがあり、再現性はなかった。このような異常現象が検出されたときに、電極

系を新鮮な状態とするか、又はそのようなデータが認められたときにはそれを除去すれば、ほぼ正当なデータが得られると考えられる。

5. まとめ

- 1) 放電開始現象は確率現象であり、大きくばらつくことが予測されたのに対して、電極間隙長変化法では、その印加電圧-50%放電開始電極間隙長関係は非常に規則的であり、かつ広範囲の印加電圧における50%放電開始電極間隙長の標準偏差は、1000pFのときは0.02~0.16mm、200pFのときは0.01~0.06mmと非常に小さかった。
- 2) 電極間隙長変化法による印加電圧-50%放電開始電極間隙長関係は、針-金属平板電極と針-導電ゴム電極系で直列抵抗や容量によらず、それぞれほぼ一定の規則的な関係を示し、ある印加電圧範囲に有効な三次式およびPaschen式で適合させた関係式を得た。直列抵抗や容量は、転移現象や大きなデータ逸脱などの異常現象の出現確率と関係した。
- 3) 印加電圧-50%放電開始電極間隙長関係は、針-金属平面電極と針-導電ゴム電極系では少し異なり、印加電圧約6000V以上では針-金属平面電極の方が次第に放電を発生しやすくなる傾向を示し、それ以下の電圧では、針-導電ゴム電極系の方が放電を発生しやすかった。また湿度が高いときや電極間隙間に試料が置かれたときは、放電を発生しにくい傾向を示した。
- 4) Paschenの平行平板金属電極の場合に比べて、針-金属平面電極、針-導電ゴム電極系とも、長い電極間隙長のところでは、放電開始電圧に非常に大きな差があり、平行平板電極の方が放電を発生しにくい、電極間隙長が短くなるにつれて、だんだんと差が小さくなった。

文 献

- 1) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌 投稿中
- 2) E. Kuroda and T. Nagaishi, Proc. of the 17th Int. Pyrotechnic Seminar P947 (1991)
- 3) R. M. H Wyatt, ERDE Report 24/R/59 (1959)
- 4) R. M. H Wyatt, P. W. J. Moore, R. J. Adams, J. F. Sumner, Proc. Roy. Soc., London, A246, 189 (1958)
- 5) 黒田英司, 永石俊幸, 工業火薬協会1993年講演要旨集, P67 (1993)
- 6) W. J. Dixon and A. M. Mood, J. A. S. A., 43, 109 (1948)
- 7) W. J. Dixon and F. J. Massey, "Introduction to statistical analysis", Chapt. 19, Forth edition,

International Student Edition

- 8) P. B. Borgan, NAVORD Report 2879
- 9) D. J. Finney, "Probit Analysis", 2nd edition, Cambridge Univ. Press(1952)
- 10) 武田 進, 「気体放電の基礎」 P71 (1990), 東京電機大学出版局
- 11) 電気学会放電専門委員会編, 「放電ハンドブック」, P103 (1991), 電気学会
- 12) 電気学会放電専門委員会編, 「放電ハンドブック」, P104 (1965), 電気学会
- 13) 静電気学会編, 「静電気ハンドブック」, P 214 (1981), オーム社
- 14) 田中 善, 山岡 清, 「化学者のためのマイコン・ガイド」(1982), 南光堂

Onset of spark discharge in electrostatic sensitivity test

by Eishi KURODA* and Toshiyuki NAGAISHI**

The statistical method has been applied to clarify the phenomena of the onset of the spark discharges observed with the approaching electrode apparatus. With the needle-plane metal electrodes and the needle-conductive rubber electrodes having air gap, the relations between the applied voltage and the gap length of the 50% onset of the spark discharge were nearly constant respectively, independently of capacitance and series resistance, and the former was more easy to occur the spark discharge in the higher voltage regions. Capacitance and series resistance effected on the deviations and scatters in the gap length of the 50% onset of the spark discharge. Differences of the onset voltage derived from the experimental data from that based on the Paschen's law were made clear.

(*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)