

電圧測定には岩通高電圧プローブHV-P30(入力抵抗:100M Ω)を用いた。充電抵抗は10M Ω であるために、電源電圧の約10/11が電極に印加される電圧(以下印加電圧と呼ぶ)となる。電流測定はTektronix A6302 およびそれとCT-5の組み合わせの電流プローブを用いた。データの記録には、Analogic Inc. のコンピュータ付波形解析装置DATA-6100を用い、データはフロッピディスク装置681によって記録した。波形解析はDATA-6100を用い、デジタル演算によって行った。測定器の性能や時間応答性については既報にゆずる⁷⁾。

3. 実験結果と検討

3.1 試験回路で生じた放電現象

容量性放電回路で、印加電圧が-1~-2kVの場合には、次のような放電現象を生じた。直列抵抗が小さい間は、回路抵抗をR(Ω)、回路インダクタンスをL(H)、容量をC(F)としたとき、 $R^2 \ll 4L/C$ の大小関係によって、それぞれ符号の順に、電圧、電流波形は減衰振動、臨界減衰振動および過減衰振動となる。これらは狭義の火花(スパーク)放電⁸⁾であり、起爆薬や二次爆薬の試験のときには重要である⁹⁻¹¹⁾が、火工品組成物の試験のときには、一般に大きな直列抵抗を接続したときよりも発火し難い場合が多いために、ここでは記述を省略した。

回路構成によって変わるが、ここに用いた火工品組成物試験用の静電気感度試験装置(回路インダクタンスを特に小さくする工夫はしていない)では、回路抵抗が約30 Ω から一方向性の放電電圧がほぼ一定に維持される定常放電が認められるようになる。回路抵抗が約30 Ω から数100k Ω の広範囲にわたって、時間軸目盛を無視すると類似した電圧、電流波形の定常放電が認められた。回路抵抗がさらに大きくなると、定常放電ではなくなり、火工品組成物を発火させる能力がほとんどない非定常の微小振動放電となる。火工品組成物の静電気感度試験を行う試験条件のもとではほとんどの場合定常放電が認められ、以下この定常放電について検討する。

3.2 放電波形例

電極間隙が空気の場合の代表的な放電電圧、電流、放電抵抗および放電電力の波形例として、容量1.5nF、直列抵抗100k Ω 、電極間隙長0.5mm、印加電圧-2.7kVのときの波形をFig.2に示す。電気的原因でできたノイズ(過渡的振動)波形やデジタル化の粗さによる波形を無視すると、ほとんど全ての試験条件において類似した電圧、電流波形が認められた。

放電電圧は、放電開始後ほぼ一定に維持され、放電の停止によって少し負の高い電圧に変化し、その後は一定になる。電流波形は放電の開始によって急速に

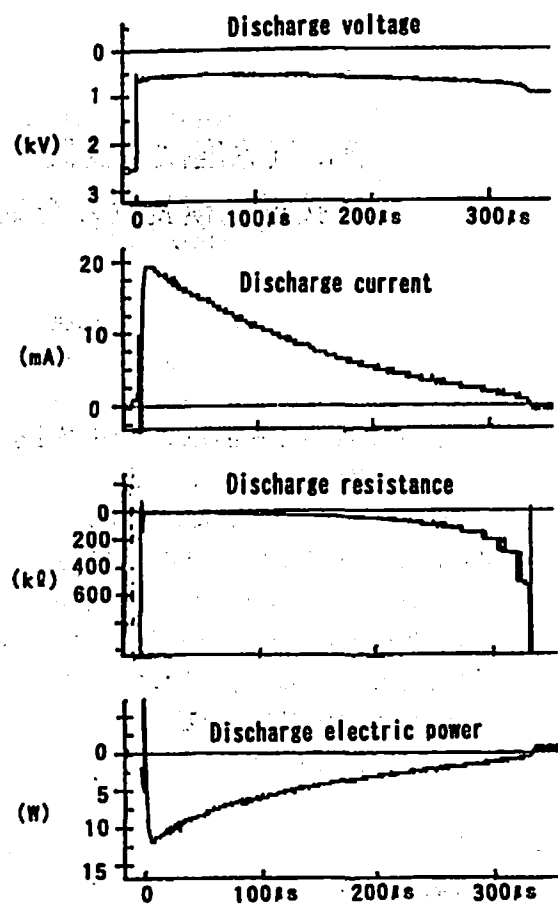


Fig.2 Typical wave forms of discharge voltage, current, resistance and electric power (C=1.5nF, series resistance = 100k Ω , gap length = 0.5mm and applied voltage = -2.7kV)

ピークに達し、その後おおよそ指数関数的に減衰するが、指数関数よりも初期の減衰は少し急速で、後は少し緩やかな減衰となる。電流が減衰して少なくなると、突然に零となり、これは電圧が負の少し高い値になったときと一致し、このときが放電を停止したときである。

放電電圧を電流で除した電極間電気抵抗(放電抵抗と呼ぶ)は放電開始直後が最も低く、時間につれて徐々に高くなっていき、放電の停止に近づくにつれて急速に高くなる。放電電圧と電流の積の放電電力の時間変化は電流波形に類似している。

これらの放電波形は直列抵抗が小さくなれば、時間軸目盛が縮小され、放電抵抗は小さくなり、電流と放電電力は大きくなるが、波形形状は類似している。印加電圧が変わると振幅と持続時間が変化するが、波形形状は類似している。また、容量が変わっても放電波形は類似しており、容量が大きくなると放電波形の時間軸が拡大されるだけに見える。

以上のような放電波形の特徴から、放電特性値を次のように定義する。電流と電力はほぼ指数関数的に減

衰するのでそのピーク値を考える(以下ピークを省略し単に電流、電力と呼ぶ)。放電電圧はほぼ一定か連続的に少し変化する。そこで放電が始まったときの電圧、放電持続時間中の平均電圧、その間の最低の電圧および放電停止直前の電圧を読みとり、それらをそれぞれ初期放電電圧、平均放電電圧、最低放電電圧および最終放電電圧と呼ぶことにする。放電抵抗は放電開始直後が最も低く、その後時間の経過につれて徐々に高くなっていくので、放電開始直後の初期放電抵抗と放電持続時間中の平均の平均放電抵抗を考える。

3.3 印加電圧による放電特性の変化

電極間隙には試料を置かず空気の場合で、容量1.5nF、直列抵抗1~500k Ω 、電源電圧-1,-2,-3,-5および-10kV(-5および-10kVは限られた直列抵抗だけについて試験)、電極間隙長が0.1mm~1.5mmの場合について、約200回の放電特性の測定を行った。

いくつかの放電特性値と直列抵抗の関係では、印加電圧ごとに不規則な関係となった。そこで放電特性値を電流の関数として表示したところ、ほとんどの放電特性値について規則的な関係が認められた。ここに、電極間隙長による放電特性値の規則的な変化はほとんど認められなかった。そこで、各種放電特性値を電極間隙長による区別をせず、明らかに変化が認められる場合が多かった印加電圧による区別を行って、電流の関数として表示した。

電流と平均放電電圧の関係は、印加電圧が高いほど平均放電電圧が高くなり、印加電圧によって異なる関係となった。そのために平均放電電圧を印加電圧で除した値、平均放電電圧比を電流に対してプロットしたときには、Fig.3に示すように印加電圧による違いはほとんど認められなくなった。他の放電電圧を印加電

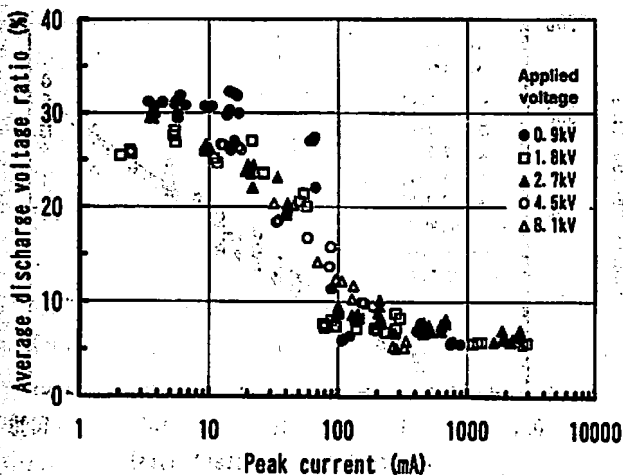


Fig.3 Relationship between peak current and average discharge voltage ratio (=average discharge voltage / applied voltage)

圧で除した各放電電圧比よりも、この平均放電電圧比が電流に対して最も規則的な関係があった。

Fig.4において、電流が大きくなるにつれて電力は大きくなるが、その関係は印加電圧により異なっている。印加電圧が高くなれば、その関係が不連続的に変わる70~120mAの範囲で限界電流が小さくなり、かつそれぞれの電流領域において電力が高くなる傾向がある。電極間隙に解放されるエネルギー(以下放電エネルギーと呼ぶ)は、ほぼ指数関数的に減衰する放電電力を放電開始から放電停止までにわたって時間積分することによって得た。なお、放電エネルギーは印加電圧によって大きく変わるために、放電エネルギーのコンデンサに貯蔵されたエネルギー($0.5 \times \text{容量} C \times \text{印加電圧の2乗} V^2$)に対する割合(以下エネルギー比と呼ぶ)として表わした。その関係をFig.5に示す。

エネルギー比は約100mAの電流を限界にして二つの領域に分けることができ、限界電流以上では電流によ

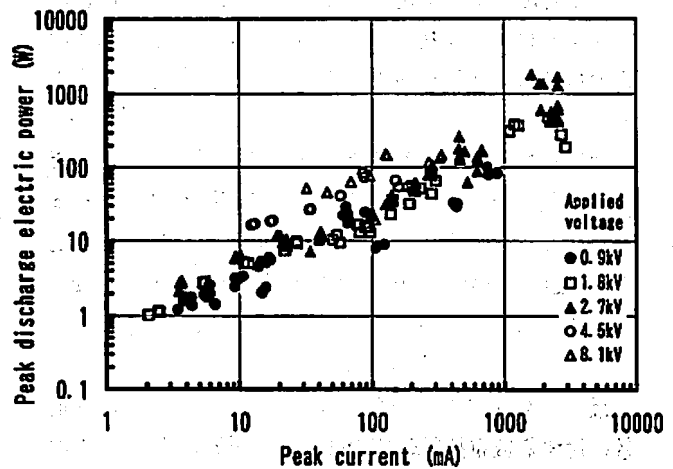


Fig.4 Relationship between peak current and peak electric power

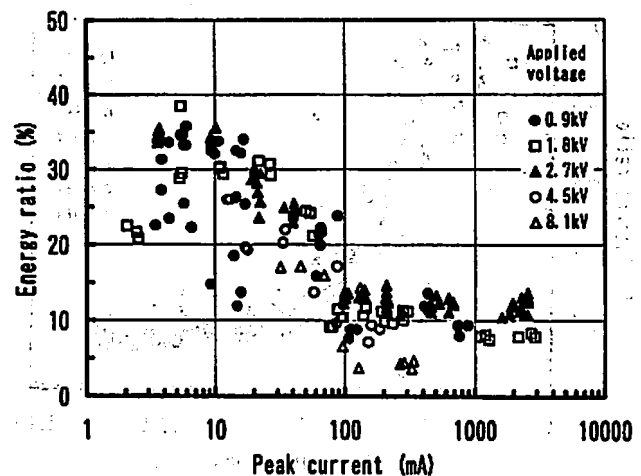


Fig.5 Relationship between peak current and energy ratio (discharge energy / energy stored in capacitor)

る変化が少ないが、限界電流以下では電流が少なくなるにつれて急速に高くなっている。また、全体的に印加電圧が高いほどエネルギー比が低くなる傾向が認められる。なお、この領域において印加電圧0.9kVと1.8kVのときにエネルギー比が逸脱したものがあり、他の放電特性値についても同様な逸脱が認められる。印加電圧が低いと電極からのイオン放出が不安定となり、電極間で安定な放電抵抗が形成されないために、放電の発生と持続が不安定となり、またそれにより測定系で大きな過渡ノイズを生じるために、大きなばらつきや逸脱を生じたと考えられる。

初期放電抵抗は、電流との関係では約100mAのところで少し不連続的变化があるが、電流が大きくなるにつれてほぼ単調に小さくなる。例えば電流が1Aのときには200Ωと小さいが、10mAのときには50kΩと大きい。初期放電抵抗を直列抵抗で除した値、抵抗比は、電流に対する関係では、Fig.6に示すように印加電圧によらず電流によって定まった。約100mA以上では初期放電抵抗は直列抵抗の約1/10以下であり、それ以下の電流域では、電流が少なくなるにつれて急速に高くなる。

放電持続時間は、電流との関係では電流が小さくなるほど長くなり、同じ電流では印加電圧が高くなるほど長くなった。そこで、放電持続時間と見掛けの時定数(容量C×直列抵抗R)との関係を調べ、それをFig.7に示す。放電持続時間と見掛けの時定数の関係の印加電圧ごとの概略の違いを調べるために、印加電圧ごとの最小二乗法による適合直線も記した。見掛けの時定数に対する放電持続時間の関係は、限界電流100mA近くでは一つの放電の間にアークとグロー放電間を不規則に転移する現象が存在するためにはばらつきが大きく

なる。また、その転移電流を境にして放電のタイプが異なり、放電抵抗が異なるために、見掛けの時定数に対する放電持続時間の関係も異なる。ここでは電流による違いを無視して見掛けの時定数と放電持続時間の関係の適合直線を求めたために、逸脱したデータが多い。しかしながら試験条件がほぼ重複しているために、印加電圧ごとの適合直線は印加電圧による違いを示すと考えられ、したがって、Fig.7は放電持続時間は印加電圧によらずほぼ見掛けの時定数で決まることを示すとしてよいであろう。

なお、印加電圧4.5と8.1kVのデータは、Fig.4に示されるように、ピーク電流近くとそれ以下に限られており、それらの適合曲線は図示の他の印加電圧の場合とは異なるために省いた。

3.3 容量の影響

300pFのときの限られた数の実験、前記1.5nFのときの2.7kVのデータのみおよび10nFのときは印加電圧2.7kVおよび3.6～9kV、直列抵抗0.5～500kΩのときの試験データを以下に比較する。

電流と平均放電電圧比の関係はFig.3に類似している。ただ、容量が大きいかほど平均放電電圧比は低くなる傾向が認められる。Fig.8に示す電流と抵抗比の関係でも容量が小さいほど抵抗比は低くなる傾向があるが、Fig.9に示す電流とエネルギー比の関係ではそのようになっていない場合があった。ノイズや波形歪みにより生じた誤差のためであろう。

電流と放電持続時間の関係は容量によって大きく異なるので、放電持続時間を見掛けの時定数に対する関係としてFig.10に示し、それらの容量ごとの適合直線も同図に示した。見掛けの時定数に対して、放電持続時間はほとんど容量によらないことがわかる。

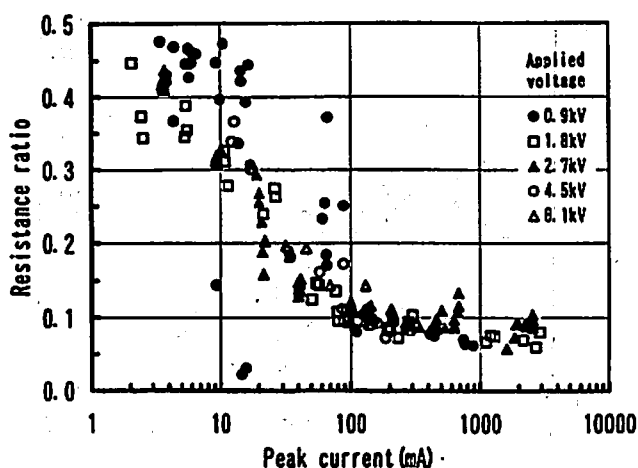


Fig. 6 Relationship between peak current and resistance ratio (discharge resistance / series resistance)

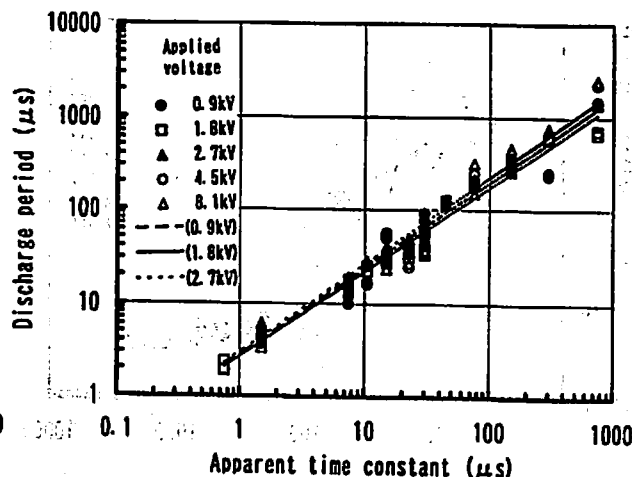


Fig. 7 Relationship between apparent time constant and discharge period

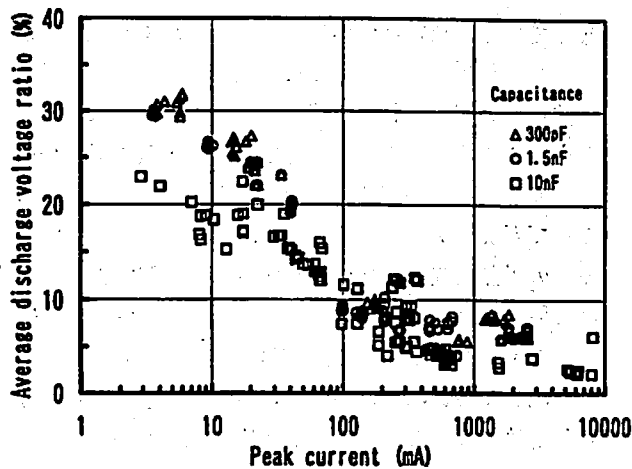


Fig. 8 Relationship between peak current and resistance ratio under 3 capacitors

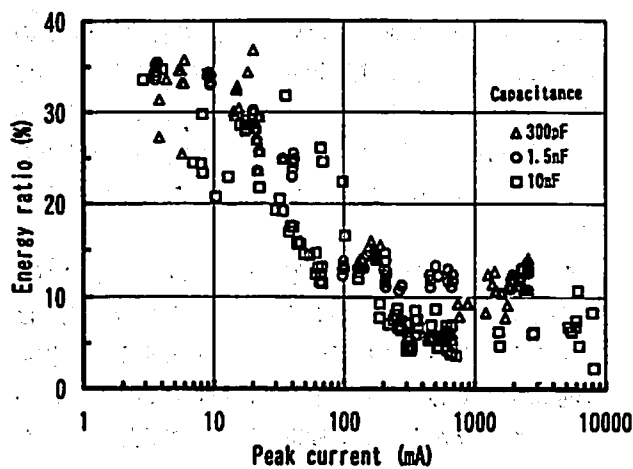


Fig. 9 Relationship between peak current and energy ratio under 3 capacitors

4. 考察

4.1 アーク放電とグロー放電

多くの火工品組成物は、静電気感度試験において、例えば容量1nFの場合、直列抵抗が数100Ωから数100kΩの範囲のある抵抗値において、発火エネルギーが最も低くなる。その直列抵抗範囲では、ほとんどの場合に、空気電極間隙ではほぼ一定の放電電圧が維持される定常な放電が形成されていることがわかった。定常放電は直列抵抗と印加電圧の関係、それによって定まる電流の大きさによって、すなわち約100mAの電流を境にして二つのタイプに分かれた。なお、この限界電流は印加電圧によって少し変化する。

直流電源、平行電極の場合の放電現象については、古典的な研究がよく知られている。大気圧の数10分の1程度の低気圧において、Meekによれば¹²⁾数A以上はアーク放電、10mA以下はグロー放電、その間の電流域は転移領域としている。また、Cobineによれば¹³⁾10A以上がアーク放電、数100mA以下はグロー放電、Loebによれば¹⁴⁾数A以上がアーク放電、数100mA以下はグロー放電とし、その間の電流域では異常グロー放電としている。また、本実験で得た放電特性値は、Flinnらの大気圧下のアークとグロー放電の特性値¹⁵⁾をそれぞれに含んでいる。

直流電源ではなくコンデンサ放電のような過渡的な電流のもとでも、Moore, SummerおよびWyatt¹⁶⁾やKirshenbaum¹⁷⁾は固定電極装置を用いて定性的にそれらの放電を明らかにしており、初期放電電圧が約275V以下の場合にはアーク放電、それ以上の電圧の場合にはスパーク放電としている。なお、スパーク放電は非常定の放電と定義されている¹⁸⁾ために、スパーク放電ではなくグロー放電と呼んだ方が適当である。この275Vの限界初期放電電圧は、印加電圧が数kVのときは約

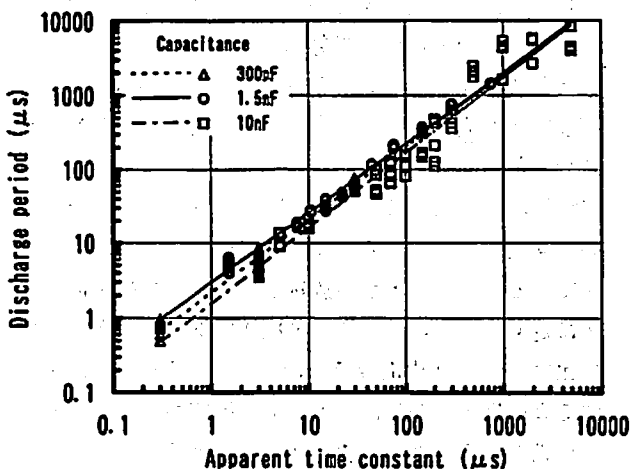


Fig. 10 Relationship between apparent time constant and discharge period under 3 capacitors

100mAの電流に相当する。

これらから本実験の大気圧下、針電極の場合には、約100mA以上の電流域における放電はアーク放電、それ以下での放電はグロー放電であるとしてよいであろう。また、異常グロー放電に相当する放電はほとんど認められない。なお、特に大気圧下のグロー放電は高気圧グロー放電と呼ばれている⁹⁾。また、定常電流の場合と同じような定常放電がコンデンサ放電のような過渡的電流でも形成されるということは、一度アークまたはグロー放電のような定常放電が形成されると、電流が小さくなくてもその放電が維持されることを示している。維持できなくなったときには別の放電に移るか放電を停止する。

限界電流近くでアーク放電となるかグロー放電となるか、また互いに転移するかどうかは、直流電源の場合

合でも確率現象である¹⁴⁾ために、定常電流でないこの場合にはさらに広い電流範囲で、確率的にばらついて生じると考えられる。Fig.3などにおいて限界電流にある範囲があるのはこのためと、印加電圧が大きくなるにつれてわずかに限界電流が大きくなるためであろう。

アークおよびグローの両放電域において、Fig.3からわかるように印加電圧が高くなるにつれて放電電圧は高くなること示されている。つまり放電電圧は放電形態によって必ずしも一定値とはならないことがわかる。しかしながら、その放電電圧を印加電圧で除した放電電圧比は印加電圧による変化が少なく、その中でもFig.3に示すように放電平均電圧比が電流と最も規則的な関係があった。

エネルギー比は、Fig.5に示すようにアーク放電領域では8~15%程度であるが、グロー放電領域では、電流が少なくなるにつれて急速に高い割合に変わり、全体としては10~40%の広範囲にわたっている。なお、印加電圧が高くなるとエネルギー比は低くなる傾向が認められる。

抵抗比は、Fig.6に示すように印加電圧によらないという傾向を示している。また、二つの放電の境界も明確である。このことから放電形態やその特徴を最も明確に定義するものは、この抵抗比であるといえる。抵抗比は、アーク放電域では約0.1以下であり、電極間隙で直列抵抗の約1/10以下の電気抵抗が放電抵抗として形成される。グロー放電域では、抵抗比は電流が少なくなるにつれて0.1から0.5位まで上昇していく。電流が少ない場合には放電抵抗は直列抵抗の1/2という高い抵抗となることがわかる。

アーク放電は約100mA以上(本研究では数Aまでの測定しかしていない)の電流域で生じ、放電電圧が低く、また抵抗比、エネルギー比ともに低く、これらは電流が大きくなるにつれてわずかに低下する。一方、グロー放電は数mA以上、約100mA以下の電流域で生じ放電電圧が高く、また抵抗比、エネルギー比ともに高く、これらの値は、電流が小さくなるにつれて急速に高くなっていく。

ここにアーク放電とグロー放電を明確に区分し定義する因子は、印加電圧によって変化する放電電圧ではなく、ピーク電流であり、さらに、印加電圧の影響を受けない抵抗比が最も適当な区分および定義因子であるといえる。

火工品組成物粉体試料の発火のしやすさには、見掛けの時定数と電極間隙長が大きく影響することが静電気感度試験によって実証された¹⁴⁾。試料物質によって最も低い発火エネルギーを示す見掛けの時定数は決

まっている。放電特性値によってこの現象を説明すると、長い見掛けの時定数で最小発火エネルギーを示す物質は低い電力が長い時間にわたって与えられた方が発火しやすく、一方、短い見掛けの時定数で最小発火エネルギーを示す物質は、高い電力が短い時間にわたって与えられた方が発火しやすいことを示している。火工品組成物の発火しやすさは、放電電力と見掛けの時定数の釣り合いで決まることがわかる。一般に、多くの火工品組成物はグロー放電で発火しやすく、鋭感な物質ほど最小発火エネルギーを示す見掛けの時定数は短くなり、アーク放電で発火しやすい。

本実験では、放電回路にノイズ源となるスイッチを使用しないということから接近電極装置で試験した。電極間隙長は0.1~1.5mmの範囲で変えているが、接近電極装置で放電を発生した電極間隙長は印加電圧によって定まる放電開始限界電極間隙長である¹⁵⁾ため、電極間隙長を変化させた影響はそれ単独には実験結果には現れず、印加電圧の影響と組合わさった形で現れたことになる。

これらの放電特性値への影響は、各放電特性値の図に示されているようにごくわずかであり、電極間隙長が試料物質の発火しやすさへ大きく影響することを考慮すると、電極間隙長の放電特性値への影響はないと考えられる。ここに測定した放電特性値は、電極間の電圧とそこを流れる電流に基づく初期値、平均値または積分値である。

電極間隙長の影響は電極間にわたる全体的影響ではなく、電極間をつなぐ放電柱自体に対する影響と考えられる。すなわち、電極間隙長が変わることによって放電柱の直径、温度、圧力などが変わり、それが発火感度に影響したものと推定される、なお、このことは別報の実験によって実証された^{16), 17)}。

5. まとめ

火工品組成物の静電気感度試験に用いる接近電極装置を使用して、空気電極間隙で生じる放電現象の電気的測定を行い、以下の結果を得た。

- 1) 直列抵抗を接続したコンデンサ放電による火工品組成物の静電気感度試験において、鋭感な感度を示す試験条件の範囲内では、試料のない空気電極間隙において、二つのタイプの定常放電が形成される。その定常放電はピーク電流が数mA~数Aの範囲で、約100mA以上の電流域ではアーク放電、それ以下の電流域ではグロー放電である。
- 2) 二つのタイプの放電を区分するのはピーク電流であり、特徴づける放電特性値は放電平均電圧比、抵抗比、エネルギー比などである。これらの値は印加電圧や容量によってわずかに変化するだけで

あるが、容量は放電持続時間に大きく影響する。 P.95(1991), 電気学会

ここに、見掛けの時定数に対する放電持続時間の関係は容量にかかわらずほぼ一定である。

9) 黒田英司, 工業火薬, 44, 83(1983)

10) 黒田英司, 工業火薬, 44, 103(1983)

3) 試料物質によって最も低い発火エネルギーを示す見掛けの時定数が決まる。これは見掛けの時定数の短い物質は、高い放電電力が短い時間内で与えられた方が発火しやすいことを示している。

11) 中野義信, 化学工業資料, 4, 121(1969)

12) J.M.Meek, "Electrical breakdown of gases", P. 507, Oxford Press, London, England(1953)

13) J.D.Cobine, "Gaseous conductors", P.183, Dover Publication Inc(195)

14) L.B.Loeb, "Fundamental processes of electrical discharges in gases", John Wiley and Sons, New York, NY(1939)

15) J.E.Flinn and W.M.Goldberger, "Chemical reaction in electrical discharge", P.144

16) P.W.J.Moore, J.F.Sumner and R.W.H.Wyatt, ERDE Report 4/T/56(1956)

17) M.S.Kirshenbaum, PA-TR-4559, AD-768161(1973)

18) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会秋季研究発表講演会講演要旨, P.17(1997)

19) 黒田英司, 永石俊幸, 平成8年度衝撃波シンポジウム講演論文集, P.129(1997)

20) E.Kuroda and T.Nagaishi, Proc.of the 18th IPS, P.511(1992)

21) 黒田英司, 永石俊幸, 静電気学会講演論文集, 93; P.433(1993)

4) 接近電極装置を用いた放電特性の測定では、電極間隙長の放電特性値への影響は現れなかった。電極間隙長の試料物質の発火しやすさへの影響は、放電柱自体の特性によるものと考えられた。(付記)本論文は既に口頭発表した^{20, 21)}ものに、追加試験データを加え、再考察し、まとめたものである。

文 献

1) 黒田英司, 永石俊幸, Explosion, 7, 170(1997)

2) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 56, 71(1995)

3) 黒田英司, 永石俊幸, 安全工学, 36, 84(1997)

4) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 57, 41(1996)

5) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 55, 214(1994)

6) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 57, 77(1996)

7) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会1996年度年会講演要旨集, P.23(1996)

8) 電気学会放電専門委員会編, 「放電ハンドブック」

On the discharge phenomena occurred in the electrostatic sensitivity test apparatus (I)

Discharge phenomena in air gap using the approaching apparatus

Eishi KURODA* and Toshiyuki NAGAISHI**

Discharge phenomena by the capacitive discharge connecting series resistance with the approaching electrode apparatus was observed in air gap without a powdered sample between electrodes and the discharge characteristics were measured. Two kinds of steady discharge were observed. They are arc and glow discharges. It was proved that the peak current determined of which discharges occurred. If the peak current is over ab.100mA, arc discharge is observed. Glow discharge is observed when the peak current is less than ab.100mA. These discharges were distinguished with the discharge characteristics such as average discharge voltage ratio (average discharge voltage/applied voltage), energy ratio (discharge energy/energy stored in a capacitor) and resistance ratio (discharge resistance/series resistance). It was suggested the discharge ignition potential for a powdered sample was most correlated with the apparent time constant and the peak electric power. In the present observation of discharge phenomena with the approaching electrode apparatus, the effect of the gap length on the discharge characteristics was not appeared.

(* Nippon Koki Co.,Ltd.,Shimbashi-Sakura Bldg., 3F, 36-1,2-Chome,
Nishi-Shimbashi,Minato-ku,Tokyo105-0003,JAPAN

** Faculty of Engineering,Kyushu Sangyou University,2-1-3,Matsuka-dai,
Higashi-ku,Fukuoka 813-8503,JAPAN)