

接近電極法と固定電極法による静電気感度の比較

黒田英司*, 永石俊幸**

火薬類の静電気感度を求めるのに使用されている接近電極装置と固定電極装置で、同一物質について静電気感度試験を行い、感度データを比較検討した。接近電極装置は固定電極装置よりもほとんどの場合短い電極間隙長で最小50%発火エネルギーを示し、より低い最小50%発火エネルギーを与えた。最小50%発火エネルギーを示した電極間隙長における直列抵抗と50%発火エネルギーの関係では、試験したほとんどの直列抵抗範囲にわたって、接近電極装置のほうが低い50%発火エネルギーを示したが、見掛けの時定数は両装置で一致した。ただ、固定電極装置で最小50%発火エネルギーを示す電極間隙長よりも長いところでは、両装置による50%発火エネルギーは一致する傾向を示した。両静電気感度試験装置による静電気感度に差が生じる場合の主な原因は、主として放電時における試料の状態の違いにあると考えられた。

1. まえがき

火薬類の静電気感度を求める代表的な試験方法としては、接近電極装置による方法と固定電極装置による方法とがある^{1, 2)}。接近電極装置は起爆薬のように非常に鋭感な物質の静電気感度を求めるために使用され、火薬類独特の静電気感度試験装置といえる^{1~4)}。固定電極装置は、広範囲にわたる火薬、爆薬、火工品原料などの各種物質の静電気感度を求めるために使用され^{4~6)}、また、それらの物質以外の粉塵雲および気体や蒸気などの最小着火エネルギーを求める装置^{7~10)}も、原理的には固定電極装置といえる。

両静電気感度試験装置の違いは、固定電極装置では両電極が固定されていて、スイッチによって放電が開始するのに対して、接近電極装置では、一方の固定された電極に他の電極がだんだんと接近していき、ある電極間隙長のところで放電を発生することである。鈍感な物質を試験する場合には、接近電極装置では電極が接近していく段階で静電力によって、また放電が起きたときには電磁力によって、試料を跳ね飛ばしてし

まい、極端な場合には、試験できないかまたは定量的なデータが得られない場合がある。ある種の物質に対しては、適当な試料飛散が生じたときには、静電気粉塵点火感度試験¹¹⁾と同じ状況となり、電極を試料中に埋め込んだ一般の固定電極装置での試験結果よりも著しく低い発火エネルギーを示す場合があるであろう¹²⁾。

また、静電気感度は電極間隙長によって大きく変わるが、接近電極装置では、放電を発生する電極間隙長が設定電極間隙長と一致するとは限らず、試験電圧が高くなると設定電極間隙長よりも長い電極間隙長で放電を発生¹³⁾し、また、その放電を発生した電極間隙長を普通には知ることはできない。接近電極装置で放電を発生する電極間隙長が設定電極間隙長と大きくは異ならないようにするためには、試験電圧を低くする必要があり、そのためにはコンデンサ容量(以下容量と略記する)を大きくすればよい。しかしながら、容量が大きくなるにつれて最小 E_{50} は高くなる¹²⁾というように、容量が静電気感度に影響する。また、容量が大きくなり印加電圧が低くなりすぎたときには、放電開始電圧が静電気感度を決定してしまう場合もある^{11), 13~15)}。

一方、固定電極装置では、接近電極装置とは異なってスイッチを用いるので、放電の前の試料の飛散はないが、スイッチによるエネルギー損失があり、特に電極間隙長の短いときに影響が大きく、鋭感な物質を試験する場合に問題となる¹⁶⁾。

このように、試料の状態が変わることや放電を発生

1996年11月12日受理

*日本工機株式会社

〒105-0003 東京都港区西新橋2-36-1

新橋桜ビル3F

TEL 03(3436)1225

FAX 03(3433)5505

**九州産業大学工学部

〒813-0004 福岡県福岡市東区松香台2-3-1

TEL 092(673)5655

FAX 092(673)5699

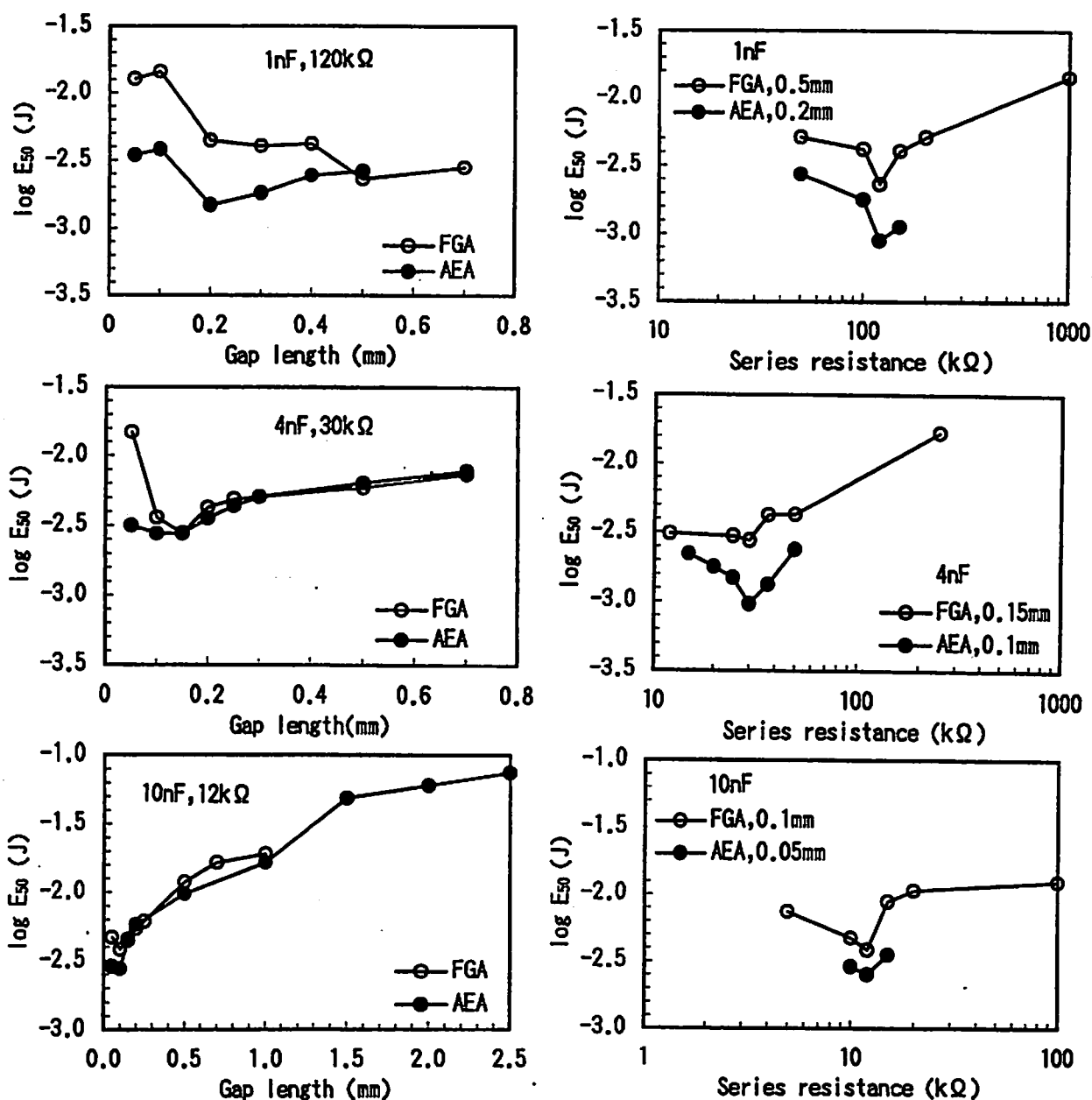


Fig. 1 Relationship between 50% ignition energy and gap length or series resistance for B-PbCrO₄ compositions using FGA (Fixed gap apparatus) or AEA (Approaching electrode apparatus)

する電極間隙長が異なるなどのために、接近電極装置と固定電極装置での試験結果とは異なる結果が得られる場合があると考えられる。

いままでにどちらの試験装置でも静電気感度を求めることができる物質に対して、両試験装置で同一の試験条件で簡単な比較試験を行ったが、試験した条件のもとではほぼ同じ感度と見なせる場合が多かった。また他の研究者もそのような結果を報告している^{2, 17, 18)}。ただ、いずれの場合も限られた条件のもとでの試験での結果であり、同一物質に対して両装置で広い試験条件にわたって比較試験を行い、静電気感度データを比較検討した報告はない。

ここでは、両静電気感度試験装置で得られる感度

データが一致するかどうかまたはどのような関係にあるかを調べるために、最小50%発火エネルギー(以下50%発火エネルギーを E_{50} と略記する)を示す電極間隙長の短いB/PbCrO₄混合系と、それが比較的長いB/BaCrO₄混合系について、両装置により静電気感度試験を行って、静電気感度を比較検討する。他にいままでに静電気感度を検討してきたZrH_{1.90}¹⁹⁾およびB/BaO₂混合系^{20, 21)}についても比較検討する。

2. 実験方法

実験装置と試験方法の詳細は、接近電極装置についてはジルコニウムの静電気感度試験の報告^{14, 16, 22, 23)}、固定電極装置については金属粉およびボロン混合系の静電気感度の報告^{20, 21, 24, 25)}に記したので、ここでは説

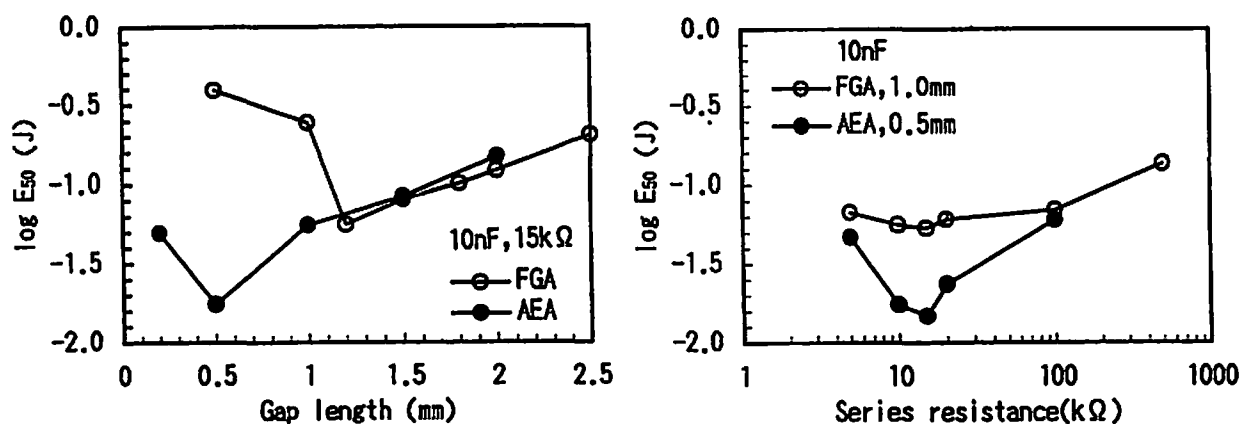


Fig. 2 Relationship between 50% ignition energy and gap length or series resistance for B-BaCrO₄ compositions using FGA (Fixed gap apparatus) or AEA (Approaching electrode apparatus)

明を省略する。

3. 実験結果

B/PbCrO₄混合系の混合比は、最も鋭感であることが試験により示された20:80²¹⁾(重量混合比、以下全て重量混合比で示す)とした。コンデンサ容量は10 nF、4 nFおよび1 nFの3容量について行った。まず、固定電極装置(Fixed Gap Apparatus、図ではFGAと記す)で、4 nFにおいていくつかの電極間隙長について直列抵抗による E_{50} の変化を求め、30 kΩで最小 E_{50} が得られることがわかった。

静電気感度試験で、ある容量範囲にわたっては、 E_{50} が最小となる見掛けの時定数(容量と直列抵抗の積)は同一混合物に対しては一定となるという法則^{11, 12, 24, 26)}が得られている。そこで4 nF、30 kΩの他、1 nFおよび10 nFで同じ見掛けの時定数となる120 kΩおよび12 kΩにおいて、電極間隙長と E_{50} の関係を求めた。試験結果をFig. 1の左図に示す。最小 E_{50} を示す電極間隙長は、1 nFのときは0.5 mm、4 nFのときは0.2 mm、および10 nFのときは0.1 mmと容量によって異なり、容量が大きくなるほど短くなり、かつ最小 E_{50} は高くなった。

そこで、それぞれの容量で最小 E_{50} を示した電極間隙長において、直列抵抗と E_{50} の関係を求めた。試験結果をFig. 1の右図に示す。最小 E_{50} を示す直列抵抗は、1 nFのときは120 kΩ、4 nFでは30 kΩ、10 nFでは12 kΩと、最小 E_{50} を求めたときの直列抵抗に一致し、したがって、見掛けの時定数は容量にかかわらず120 μsと一定となることが証明された。

接近電極装置(Approaching Electrode Apparatus、図ではAEAと記す)でも、同じ三つの容量で、それぞれ固定電極装置の場合と同じ直列抵抗について、電極間隙長と E_{50} の関係を求めた。試験結果を固定電極装置の結果を示したFig. 1の左図と一緒に記した。最小 E_{50}

を示す電極間隙長は、1 nFでは0.2 mm、4 nFでは0.1 mm、10 nFでは0.1 mmとなり、固定電極装置の場合よりも短い同じ電極間隙長において最小 E_{50} が得られ、容量が大きくなるにつれて最小 E_{50} は高くなる傾向が認められる。

そこで、それぞれの容量について最小 E_{50} が得られた電極間隙長において、直列抵抗と E_{50} の関係を求めた。試験結果をFig. 1の右図に固定電極装置の結果と一緒に示した。それぞれの最小 E_{50} を示した直列抵抗は電極間隙長と E_{50} の関係を調べたときの直列抵抗に一致し、また、固定電極装置での相当する容量における最小 E_{50} を示す直列抵抗とも一致した。さらに、試験した全ての直列抵抗範囲にわたって、接近電極装置の方が低い E_{50} を示した。

B/BaCrO₄混合系は、実用の点火薬組成として用いている混合比(5:95)²¹⁾について試験した。容量10 nFで、いくつかの電極間隙長での試験において最小 E_{50} を示した直列抵抗15 kΩで、電極間隙長と E_{50} の関係を求めた。次に、そこで最小 E_{50} を示した電極間隙長において、直列抵抗と E_{50} の関係を求めた。一方、接近電極装置でも同じ直列抵抗について、電極間隙長と E_{50} の関係を求めた。最小 E_{50} は固定電極装置より短い電極間隙長で得られ、その電極間隙長において直列抵抗と E_{50} の関係を求めた。B/BaCrO₄混合系について得られた固定電極装置と接近電極装置の電極間隙長と E_{50} の関係および直列抵抗と E_{50} の関係をFig. 2に示す。

ZrH_{1.90}については、見掛けの時定数600 μsで最小 E_{50} を示すことがわかっている²⁶⁾ので、容量10 nFにおいて直列抵抗60 kΩで、両装置で電極間隙長と E_{50} の関係を求めた。最小 E_{50} は固定電極装置より接近電極装置の方が短い電極間隙長で得られたので、両装置で最小 E_{50} を示したそれぞれの電極間隙長で、直列抵抗と

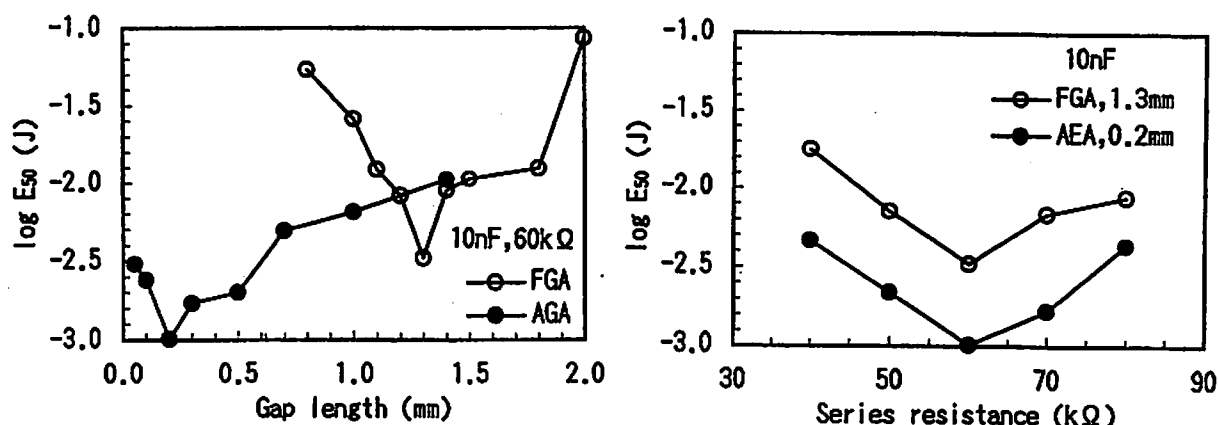


Fig. 3 Relationship between 50% ignition energy and gap length or series resistance for $\text{ZrH}_{1.90}$ using FGA or AEA

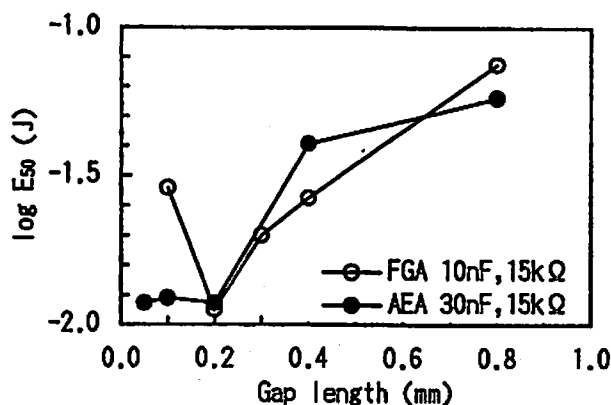


Fig. 4 Relationship between 50% ignition energy and gap length for B- BaO_2 compositions using FGA or AEA

E_{50} の関係を求めた。結果をFig. 3に示す。

以前に行った比較試験結果の一例として、B/ BaO_2 混合系で最も鋭感であった(20:80)²¹⁾の混合比について、固定電極装置で10nF, 15kΩおよび接近電極装置で30nF, 15kΩの試験で得られた電極間隙長と E_{50} の関係をFig. 4に示した。

4. 考 察

固定電極装置と接近電極装置で、それぞれ同じ直列抵抗について求めた電極間隙長と E_{50} の関係を示したB/ PbCrO_4 混合系のFig. 1, B/ BaCrO_4 混合系のFig. 2および $\text{ZrH}_{1.90}$ のFig. 3の全てにおいて、共通して次のようなことが認められる。

最小 E_{50} はほとんどの場合接近電極装置のほうが短い電極間隙長で得られ、かつ、その値は接近電極装置のほうが低くなっている。なお、B/ PbCrO_4 混合系の10nFでの試験結果のみ最小 E_{50} は同じ電極間隙長で得られているが、これは両装置とも精度良く設定できる最も短い電極間隙長が約0.05mmであることと実験の精度^{14, 21, 22)}(最小設定電極間隙長間隔が接近電極装置では0.02mm, 固定電極装置では0.05mm)から生じた

ものと考えられる。

次に、固定電極装置で最小 E_{50} を示した電極間隙長よりも長い電極間隙長においては、両装置で得られた E_{50} がほぼ一致するようになる傾向を示しており、またその電極間隙長よりも短いところでは、接近電極装置のほうが低い E_{50} を示していることがわかる。

このように接近電極装置と固定電極装置では、B/ PbCrO_4 , 10nFでの試験を除いて、異なった電極間隙長で最小 E_{50} が得られたので、各容量で最小 E_{50} を示した電極間隙長において、直列抵抗と E_{50} の関係を調べた。Fig. 1～3の右図に示されているように、B/ PbCrO_4 混合系については三つ容量の全てについて、また、3種類の混合系全てについて、接近電極装置のほうが試験したほぼ全ての直列抵抗範囲にわたって低い E_{50} となっていることがわかる。そして、最小 E_{50} を示した直列抵抗は接近電極装置と固定電極装置で一致しており、両装置で得られる見掛けの時定数は一致していることがわかる。

特に、 $\text{ZrH}_{1.90}$ については、最小 E_{50} を示す電極間隙長が、固定電極装置では1.3mm, 接近電極装置では0.2mmと大きく異なり、またそれらの最小 E_{50} も3.3mJと1.0mJというように異なっている。それにもかかわらず、両装置とも直列抵抗60kΩ, 見掛けの時定数600 μs で最小 E_{50} を示している。ポロン混合系で認められた見掛けの時定数に関する規則性がこの場合にも成り立っていることがわかる。

B/ BaO_2 混合系は、見掛けの時定数に関する法則を見出す以前に行った両装置の比較試験結果を一例としてここに示した。B/ BaO_2 混合系は、最小 E_{50} が得られる見掛けの時定数は、その後の試験で40 μs である²¹⁾ことがわかったが、Fig. 3の試験では固定電極装置が150 μs , 接近電極装置が450 μs と異なった見掛けの時定数のところで試験を行っている。それにもかかわらず、最小 E_{50} を示した電極間隙長よりも長いところで

は両装置の E_{50} はほぼ一致する傾向を示している。ただ、電極間隙長がそれよりも短いところでは不一致であり、接近電極装置の方が低い E_{50} を示している。

従来、筆者らはまた他の研究者も、両装置による静電気感度の比較は、接近電極装置が鋭感な物質を試験する装置であるために、鋭感な物質を対象として試験してきた。その場合には最小 E_{50} を示す電極間隙長は固定電極装置の場合でも短く、それ以下の電極間隙長における感度データは得られないかまたは無視してしまいがちである。また、両装置による感度の比較は最小 E_{50} を示す電極間隙長よりも長い電極間隙長において、また、最小 E_{50} を示す条件から離れた条件で行いがちであり、このような場合には両装置による感度の差は少なくなる傾向が認められた。このようなことから、Fig. 4 の場合のように、両装置による感度データはほぼ一致するという結果を出した場合があると考えられる。

以上の実験および検討結果から、接近電極装置と固定電極装置で得られる静電気感度の差は、次のような場合に大きくなることがわかる。

- ・ 固定電極装置で最小 E_{50} が得られた電極間隙長よりも短い電極間隙長の場合
- ・ 試験容量が小さくなり、最小 E_{50} を示す電極間隙長が長くなった場合
- ・ もともと固定電極装置で最小 E_{50} を示す電極間隙長が長い場合

このように両装置による静電気感度の違いにはいずれも電極間隙長が関係している。

前に述べたように、固定電極装置では、試験電圧で設定電極間隙長で放電が発生する。それに対して、接近電極装置では、固定された一方の電極に他の電極が接近していく段階で、試験電圧における放電開始電極間隙長になったときに放電が発生し、その放電開始電極間隙長は普通には設定電極間隙長よりも長い。また、電圧が印加された状態の一方の電極が、固定された電極およびその上に置かれた粉体試料に接近していくので、粉体試料は静電力の影響を大きく受け、また、電極間隙よりも上の試料の厚さが薄くなり、放電時の電磁力および放電の力学的作用の影響を大きく受ける。このために接近電極装置の場合には試料が浮いた状態となり、見掛け上装填密度が低くなって、または試料が飛散して空気中の酸素との接触が増加して、発火エネルギーが低下する場合を生じたと考えられる。

試料の浮き方や飛散等試料の状態、また、それによる発火エネルギーの低下は、試料の種類や試料自体の物理的状态(粒度、密度、粒子形状など)によって異なる

ために、試料によって両装置による感度差は異なると考えられる。また、試料の状態には電極間隙長自体および試験電圧¹⁶⁾が、また、放電特性自体の違い²⁷⁾も関係すると考えられる。両装置による感度の違いが、固定電極装置で最小 E_{50} を示した電極間隙長よりも短いところで大きいなど、両装置による感度の違いの詳細については、電極間隙長の放電に及ぼす影響に関する実験^{28, 29)}などで検討中である。

以上のように、両装置での静電気感度の差が生じる場合の主な原因は、放電時の試料の状態の違いに基づくと考えられる。

鋭感な物質を人が取り扱うときには、人体の静電気がエネルギー源となり、動いている人体または人が持っている物からの放電が問題となる。その意味で接近電極装置の方がより厳密に実際の状況をシミュレートしているといえる。また、静電気感度試験では最も鋭感なデータを得ることが原則である。このようなことから、またより厳密な最小 E_{50} を求めることができる接近電極装置の方が、鋭感な物質を試験するのには適当であるといえる。ただ、鋭感でない物質を試験する場合には、試験電圧を低くするために大きな容量を使用する必要があり、その場合には最小 E_{50} が高くなる。容量による最小 E_{50} の変化の程度と両装置による最小 E_{50} の差の大小関係によって、どちらの静電気感度試験装置を使用すべきかが決まるであろう。

5. まとめ

- (1) 同一物質に対する固定電極装置と接近電極装置での静電気感度試験において、最小 E_{50} はほとんどの場合接近電極装置の方が短い電極間隙長で得られ、最小 E_{50} は接近電極装置の方が低い値であった。
- (2) 最小 E_{50} を示した電極間隙長では、広い直列抵抗範囲にわたって、接近電極装置のほうが低い E_{50} を示し、最小 E_{50} を示す直列抵抗、そして見掛けの時定数は両装置で一致した。
- (3) 固定電極装置で最小 E_{50} を示す電極間隙長よりも十分に長い電極間隙長においては、固定電極装置と接近電極装置ではほぼ等しい E_{50} が得られるが、短い電極間隙長においては、接近電極装置のほうが低い値となる。
- (4) 接近電極装置と固定電極装置での静電気感度の差が生じる場合の主な原因は、両装置における放電時の試料の状態の違いにもとずくと考えられた。

文 献

- 1) 工業火薬協会感度専門部会編, “工業火薬協会規格(Ⅱ)”, 工業火薬協会(1985)
- 2) B. L. Fedoroff and O. E. Sheffield, “Encyclopedia of

- Explosives and Related Items", E-35, AD-768063, PATR-2700(vol. 5) (1972)
- 3) R. M. H. Wyatt, P. W. J. Moore, R. J. Adams and J. F. Sumner, Proc. Roy. Soc., London, A246, No. 1245, 189(1958)
 - 4) 黒田英司, 静電気学会誌, 18, 276(1994)
 - 5) 黒田英司, 工業火薬, 44, 103(1983)
 - 6) 中野義信, 化学工業資料, 4, 121(1969)
 - 7) B. Lewis and G. von Elbe, "Combustion, Flame and Explosion of Gases", P. 323, 2nd Edition, Academic Press(1961)
 - 8) 疋田強, "火災・爆発危険性の測定法", P. 137, 総合安全研究所(1977)
 - 9) H. G. Dorsett, Jr, M. Jacobson, J. Nagy and R. P. Williams, U. S. Bureau of Mines RI5624(1960)
 - 10) 秋田一雄, 安全工学, 7, 296(1968)
 - 11) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 56, 71(1995)
 - 12) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 59, No. 3(1998) 掲載予定
 - 13) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 55, 214(1994)
 - 14) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 56, 78(1995)
 - 15) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 56, 165(1995)
 - 16) 黒田英司, 永石俊幸, 衝撃波シンポジウム講演要旨集, P. 155(1996)
 - 17) C. R. Westgate, B. D. Pollock and M. S. Kirshenbaum, PA-TR 4319, AD742667(1972)
 - 18) M. S. Kirshenbaum, "Electrostatic sensitivity", in "Energetic Materials", edited by H. D. Fair and R. F. Walker, Plenum Press(1977)
 - 19) 高山昌幸, 永石俊幸, 黒田英司, 火薬学会誌, 53, 143(1992)
 - 20) 黒田英司, 永石俊幸, 安全工学, 35, 124(1996)
 - 21) 黒田英司, 永石俊幸, 安全工学, 36, 84(1997)
 - 22) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 55, 251(1994)
 - 23) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 55, 258(1994)
 - 24) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 57, 41(1996)
 - 25) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会誌, 57, 85(1996)
 - 26) 黒田英司, 永石俊幸, 第26回安全工学研究発表会講演要旨集, P. 187(1993)
 - 27) 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)
 - 28) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会秋季研究発表会講演要旨, P. 17(1997)
 - 29) 黒田英司, 永石俊幸, 火薬学会1998年度年会講演会発表予定(1998)

Comparison of electrostatic sensitivity between fixed gap method and approaching electrode method

by Eishi KURODA* and Toshiyuki NAGAISHI**

The fixed gap method and the approaching electrode method have been adopted to measure electrostatic sensitivity of explosives and pyrotechnic materials. In this experiment, electrostatic sensitivity test of pyrotechnic materials was carried out by the two methods to compare electrostatic sensitivity between them. Minimum energy of 50% ignition by the approaching electrode method was obtained with shorter gap length and given to be smaller than that by the fixed gap method. The relation between series resistance and energy of 50% ignition under the gap length of minimum energy of 50% ignition showed that the approaching electrode method gave low energy of 50% ignition than the fixed gap method, but apparent time constant was nearly equal in both methods. With the gap length longer than one giving minimum energy of 50% ignition by the fixed gap method, energy of 50% ignition seemed to become nearly equal in both methods. It was considered that differences of electrostatic sensitivity between both methods were based on the physical conditions of sample during discharges.

(*Nippon Koki Co., Ltd., Shimbashi-Sakura Bldg., 3F, 36-1, 2-Chome, Nishi-Shimbashi, Minato-ku, Tokyo 105-0003, JAPAN

**Faculty of Engineering, Kyushu Sangyou University, 2-1-3, Matsuka-dai, Higashi-ku, Fukuoka 813-0004, JAPAN)