

# 無煙火薬の帯電に関する研究 (第3報)<sup>1)</sup>

## 火花放電による無煙火薬への着火条件

植竹 万太郎・佐藤 寛\*

### 1. 緒言

静電気の火花放電による無煙火薬への着火条件について実験を行なったので報告する実験に使用した装置は Fig. 1 に示すとおりである。交流 100V の電源をスライダック及びトランスで変圧し真空管 1K22 で半波整流してコンデンサー C に充電する。充電の終了は静電圧計の針の静止で確認する。充電を終った

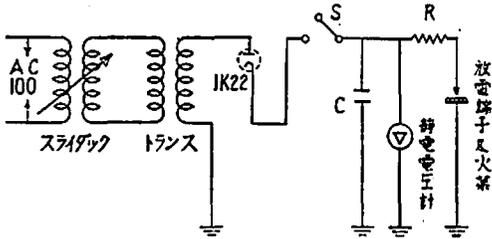


Fig. 1 実験装置略図

後スイッチ S を切り試料を乗せたアース側極板を針状の高電圧端子に接近させて放電させる。スライダックは電圧を任意に変更させるためのものである。

### 2. 放電回路による着火条件

#### 2.1 回路中の電気抵抗<sup>2)</sup>

放電回路中の電気抵抗を大きくすると着火率が増加し最高に達し更に抵抗を増せば再び着火しなくなる。Fig. 2 Fig. 3 にその結果を示す。実験に使用した火薬はニトログリセリンを含む板状の火薬でその成分は Table. 1 の通りである。C 及び R を含む回路の放電方程式は  $V = V_0 e^{-t/CR}$  であり R の存在は放電時間の存在を示す。即ち回路中に抵抗の存在する場合は抵抗のない場合に比較して火花放電の時間が非常に長くなる。このことは火花の肉眼観察においても充分感ぜられる。但し火花間隙における抵抗 R はオームの法則が成立せず絶縁が破壊され火花の発生するまではかなり大きな抵抗であるが一度火花放電を始めると急激に抵抗値は減少する。

#### 2.2 放電端子の接近速度

放電端子の接近速度で火薬への着火条件が如何に変化するか実験を行なった。実験に使用した火薬は

Table. 1 D. B. 無煙火薬の成分

形 状	板 状
綿 薬	50.77%
ニトログリセリン	43.12%
エチルセントラリット	0.72%
ジエチルフタレート	3.02%
硝 酸 加 里	1.37%
水 分	0.45%

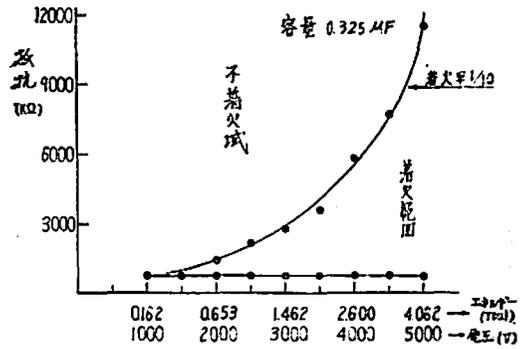


Fig. 2 電気抵抗と着火率

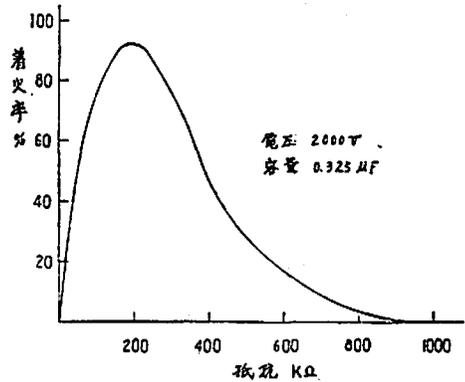


Fig. 3 電気抵抗及び電圧と着火範囲

Table. 2 に示す組成のものを使用した。実験の結果は Fig. 4 に示すように接近速度が速くなると放電時間が短くなり着火率が低下する。実験装置の都合で接近速度が更に遅くなった場合は実験出来なかつたが理論的には単位時間当り放電エネルギーが小となるので

昭和37年11月20日受理

\* 大分県北海部郡坂ノ市町 旭化成工業 (株) 坂ノ市工場

Table. 2 S. B. 無煙火薬の成分

形 状	Bulky 60# 通過
綿 薬	80 %
Ba (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	8.0 %
KNO <sub>3</sub>	8.0 %
デフエニールアミン	0.75%
色 素	0.25%
で ん 粉	2.75%
水 分	0.25%

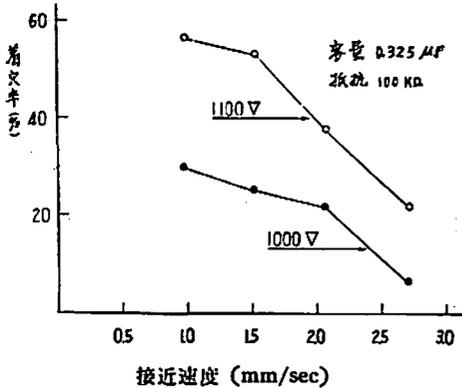


Fig. 4 放電端子の接近速度と着火率

接近速度が極度に遅くなると着火も困難になるものと思われる。

従つてもつとも着火し易い接近速度が予想される。

### 2. 3 放電端子の形状

放電端子の形状つまり尖り具合によつても着火が左右される。曲率半径の大きい方が同一エネルギーで比較した場合 Fig. 5 に示すようにエネルギーの空間密度が小となる。曲率半径の測定は行なはなかつたが先端を尖らした場合と丸くした場合の比較測定結果は Table. 3 に示すように曲率半径の大きくエネルギー密度の小なる方が着火が容易である。使用した火薬の組成は Table. 2 に示したものである。Table. 3 の結果に対する考察は後で詳述する。

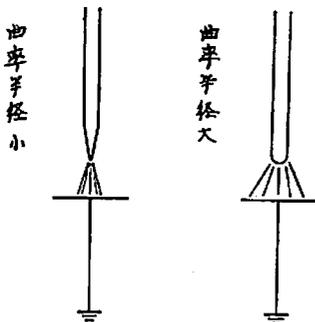


Fig. 5 電極の形状と火花の状態

Table. 3 端子の曲率半径と着火率

回 数	端子 数	曲率半径小 (針状端子)	曲率半径大 (球状端子)	備 考
着 率	1	3/10	9/10	電圧—3,000V 火薬—Table 2 参照
	2	2/10	7/10	
火	3	3/10	8/10	容量—300 μF 抵抗—100kΩ
	4	2/10	9/10	

### 2. 4 放電エネルギー

静電気のエネルギーは  $1/2 QV = 1/2 CV^2$  で表わされるがこのエネルギーと着火率の関係を調査したのが Fig. 6 である。実験条件は Table. 2 の試料を使用し 1/50 の着火率の点を求めたものである。Fig. 6 に示すようにエネルギーの線と着火率の線は一致しない。このことはいろいろの解釈が出来る。火薬の受取

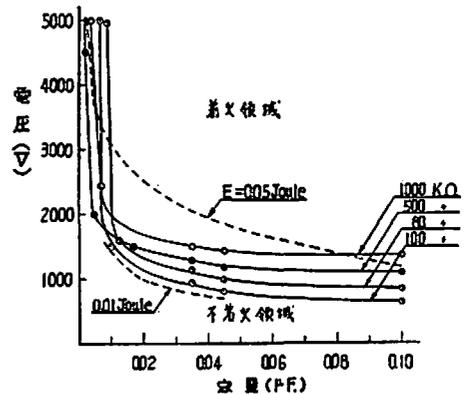


Fig. 6 電圧と容量及び抵抗に依る火薬の着火限界

るエネルギーとコンデンサーに蓄積されたエネルギーの不一致。或いは後述するように固体火薬を分解しガス化する為の余分のエネルギー等細々考えられる。又火薬に着火するエネルギーは Fig. 6 によると最低約 10mJ でありこの値は可燃性の溶剤蒸気の場合に比較してははるかに大きいことがわかる。例へばエーテルガスの場合ガス濃度や組成(酸素との割合)にもよるが空気との混合ガスの場合最低 0.2mJ より着火する<sup>3)</sup>。

### 3. 火薬による着火条件

#### 3. 1 火薬の加熱処理

火薬を加熱処理すれば当然その熱安定度は低下する。この実験では加熱処理した火薬と加熱処理を行わない火薬との間に静電気による着火に差があるかどうかの確認を行なった。実験の結果は Table. 4 に示

すようにはつきりした差は認められない。試料は Table. 1 に示したものを使用し加熱処理の方法は耐熱試験用の試験管及び油浴を使用し 120°C に各時間加熱した。

Table. 4 無煙火薬の加熱時間と着火率  
加熱温度 120°C

抵抗	加熱時間	0分	1時間	2時間	3時間	4時間
100 kΩ		90	83	87	90	93
200 "		93	97	93	90	90
300 "		83	87	73	80	73
400 "		47	40	53	50	47
500 "		13	17	33	20	20
600 "		0	13	17	10	7
700 "		0	3	10	13	3
800 "		0	0	0	10	3
900 "		0	0	0	3	0
1000 "		0	0	0	0	0

電圧 2,000V 容量 0.325μF

### 3. 2 火薬の粒度

火薬の粒度は小さい方が着火が容易であろうと想像される。実験に使用した火薬の成分は Table. 2 に示した。実験の結果は明らかに粒度の小さい方が着火が容易である。(Fig. 7 参照) この理由としては火花によるエネルギー授受は薬の表面で行なわれ粒度の小さい方が表面積が大きい。又小粒であるほど空気による断熱効果が良好で温度上昇が容易な為と思われる。尚粒度について粉じんの場合も同様なデータが発表されている<sup>4)</sup>。

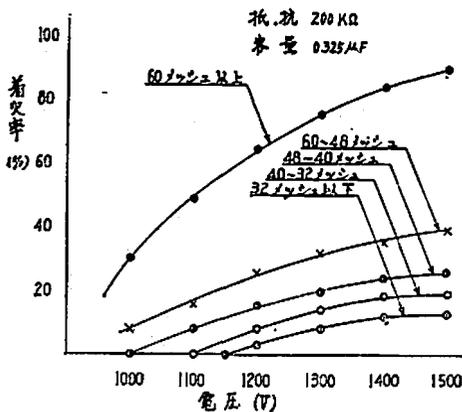


Fig. 7 火薬の粘度と着火率

### 3. 3 火薬の成分

火薬の組成によって静電気による着火性がどう変化するかの実験を行なった。先づニトログリセリンの影

響は Table. 5 に示すように明らかにニトログリセリンを含むダブルベース火薬の方がシングルベース火薬より着火に関してニトロセルローズより感度が良好であると云へる。但し摩擦帯電はニトログリセリンを含むダブルベース火薬の方が少ない<sup>5)</sup>。これはダブルベース火薬の方が電気伝導度が良好な為である。火薬にグラファイトを塗布すれば着火率は低下する。実験に使用した火薬の組成は Table. 6 に示した。表中ジフェニルアミンは安定剤として使用した。更にジニトロトルエン及びジブチルフラレートの影響について実験を行なったのが Table. 7 である。この両者は何れも無煙火薬の膠化剤として使用するものである。実験誤差が大きくこれ等の物質の影響ははつきり現れてない。試料は Table. 6 のシングルベース火薬を基剤とし外割 % でジニトロトルエン及びジブチルフラレートを配合した。

Table. 5 無煙火薬の組成と着火率

グラファイト Base	電圧 V	Base				
		1,800	1,900	2,000	2,100	2,200
シベ ン グ ル ス	0 %	43%	63%	77%	83%	87%
	1 %	23%	38%	52%	60%	70%
	2 %	11%	21%	30%	43%	65%
ダ ベ ブ ル ス	0 %	43%	70%	80%	90%	95%
	1 %	39%	50%	64%	75%	85%
	2 %	32%	44%	55%	65%	75%
備 考	容量 0.325μF, 抵抗 200kΩ 薬種 Table.6 参照					

Table. 6 球状無煙火薬の成分

成 分	シングルベース	ダブルベース
ニトロセルローズ	99.0%	92.0%
ニトログリセリン	0 %	7 %
ジフェニルアミン	1.0%	1.0%
備 考	形状, 球状火薬	

Table. 7 DNT及びDBPの含有量と着火率

DNT%	DBP%		
	0	3	6
0	14/20	7/20	6/20
3	10/20	9/20	11/20
6	6/20	7/20	10/20

電圧—2,000V 容量—0.325μF 抵抗—100kΩ

### 3. 4 火薬の含有水分と着火性

火薬の含有水分と着火性の関係について実験を行なった。組成は Table. 2 に示す火薬である。実験の結果 Table. 8 に示すように意外な結果がでた。即ち水分が相当多くなつても着火率は低下しないだけでなくむしろ増加する。この実験で火花の状況を詳しく観察した結果次ぎの事実が判明した。

1) 水分の少ない試料は火花が両電極の間で飛び火薬が電極として作用することはない。

2) 水分の多い試料は高压端子と火薬との間に直接火花が飛ぶ。つまり火薬がそのまま電極として作用する。但し火花によつて一度着火するが燃焼が持続せず消える場合が多い。

試料に水分が多いと火薬は電導性を帯びその結果高压端子と火薬との間に直接火花が飛ぶようになるつまり火薬の受けるエネルギーの効率が高くなるものと思われる。Fig. 8 及び Table. 8 参照。

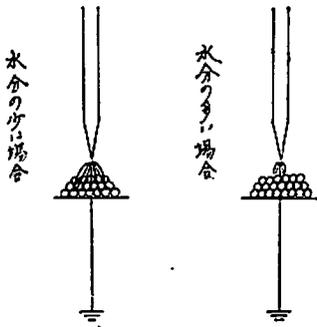


Fig. 8 火薬の水分と火花の状態

Table. 8 火薬の水分と着火率

水分	0.87%	0.95%	2.35%	5.40%	8.07%
着火率	94%	90%	88%	100%	100%

電圧—1,300V 容量—0.325 $\mu$ F 抵抗—100k $\Omega$  n-50

### 4. その他の着火条件

#### 4. 1 温度及び湿度

温度及び湿度によつて着火率に著しい差があるかどうかの実験を行なった。実験の結果は Fig. 9, Fig. 10 に示すように普通の温度及び湿度（相対）の範囲では誤差が大きく相関が現れない。

#### 4. 2 極性と着火率

放電の極性により着火条件がどう変るか実験した。Fig. 1 の実験装置で針状端子を正電極にした場合と負電極にした場合着火率には全然差は認められなかつた。実験条件は Fig. 7 に示した粒度のもつとも小さ

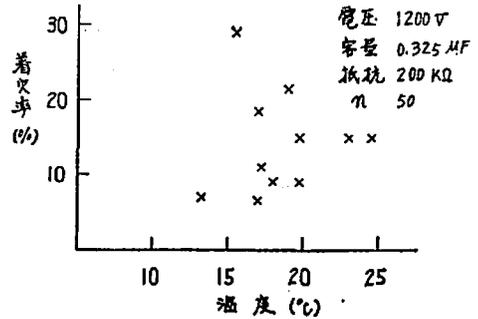


Fig. 9 実験室内の温度と着火率

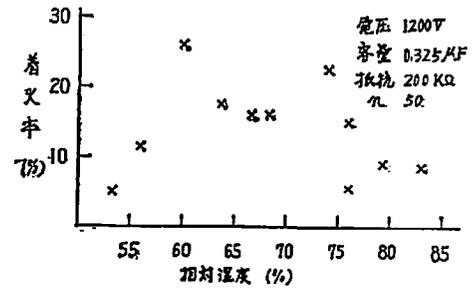


Fig. 10 湿度と着火率

な場合で試験成績は正の場合 52/100 負の場合 49/100 である。

### 4. 3 コロナ放電による着火

帯電した火薬と接地した火薬の間にはコロナ放電の可能性がある。これは雷雲中に避雷針を挿入したのと同じ状態である。実験に使用した放電端子の形状を Fig. 11 に示す。高压端子の直径は約 10mm 針状の接地端子の径は約 1mm である。高压端子の電圧が 3,500V 附近よりコロナが発生し 5,000V 附近より火花放電に移行する。実験は火花放電直前の 4,500V で行ない電流は 1~1.5 $\mu$ A である。結論から述べると

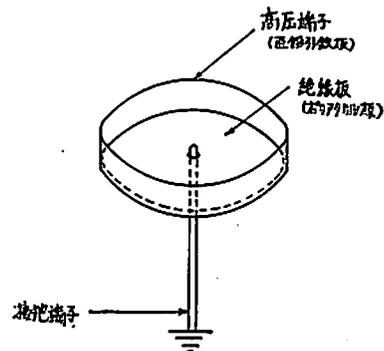


Fig. 11 コロナ放電端子の形状

どんな場合も火薬は発火しなかった。実験の条件は次ぎの通り。火薬の位置として a) 針状電極に接して置いた場合、b) 環状電極に接して置いた場合、c) 両者の中間に置いた場合、d) 針状電極と環状電極の間に一様に火薬を拡げた場合以上 4 種類次ぎに放電の極性として、a) 針状電極を正にした場合、b) 針状電極を負にした場合、以上 2 種類組合せて  $4 \times 2 = 8$  種類の実験を行なった。試料の組成は Table. 2 に示すもので一番着火し易いものである。放電時間は何れの場合も約 10 分間である。実際の問題として  $1 \sim 1.5 \mu A$  程度の電流が 10 分間放電すれば  $600 \sim 900$  マイクロクーロンの電荷が中和されたことになるのでコロナ放電が 10 分間も持続すること先づないのではなからうか。

### 5) 着火機構の考察

前記実験結果を総合して考察すると次ぎのようになる。先づ放電回路の電気抵抗は放電時間を左右することは既に述べたとおりであるが同様に容量  $C$  も放電方程式で明らかのように放電時間を左右する。Fig. 6 に示したように火薬に着火する為の最低容量が必要なことは抵抗の場合と同様着火に必要な最少限の火花放電時間を意味している。又 Fig. 6 に示すように一定電圧以下で着火しないという事実は火花放電が電位傾度  $V/d$  で発生する以上最少限の火花距離  $d$  を必要とすることである。尚電極の曲率半径が大になれば火花の占める空間が大となり火薬に着火し易くなる。これらは火薬に着火するために最少限の火花空間の必要なことを意味している。要するに火花放電によつて火薬に着火する為には

- 1) 最少限の火花放電時間
- 2) 最少限の火花放電空間

が必要である。この理由は火花によつて火薬が分解しガス化しそのガス化しそのガスに着火しついで火薬に着火する為と思われる。分解しガス発生に時間を要するためと思われる。例えば我々の実験ではエーテルと空気との混合気体の場合 Fig. 12 に示すように抵抗の存在しない方が着火が容易である。

次に最少限の火花空間の必要な理由について考察する。今可燃性ガスが一定温度  $T$  に加熱されると一定速度で酸化反応が進行する。この時の熱の発生量は加熱ガス量つまり火花空間の大きさに比例する。一方熱の逸散は加熱部分の表面積に比例する。つまり加熱部分の体積が少なくなると熱の発生量より逸散量が大となり温度は低下し従つてガスは発火しない。例えば酸水素爆鳴気の場合火花間隙を  $0.2mm$  以下に短縮すると着火しなくなるという<sup>6)</sup>。我々の実験では約  $800V$  附近から着火し難くなる。(Fig. 6 参照) 空気の絶縁

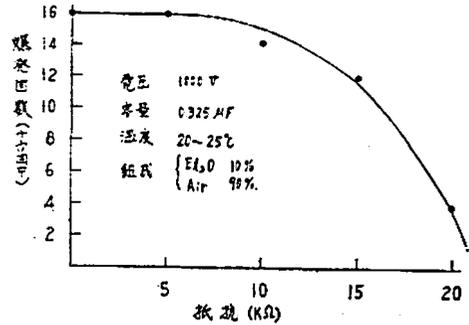


Fig. 12 火花に依るエーテルガス爆発実験

破壊強度を  $3,000V/mm$  とすると  $800V$  では  $0.27mm$  となり火花間隙の限界である。要約すれば火花照射により火薬が分解し分解ガスが一定温度発火点に達してガスに着火し続いて火薬に着火するものと思われる。

### 6. 結論

前記実験結果で述べたように無煙火薬の場合、火花放電で直接着火するためには電気抵抗、最少電圧及び容量、火薬の粒度等種々の制限があり、これ等の条件を同時に充した時に発火する。従つて火薬が静電気火花で直接発火することは少ないが事故は偶然の重りにより発生するものであり次ぎのような作業条件はさげねばならない<sup>7)</sup>。

- 1) 帯電を増加させるような条件として

- a) 接触摩擦面積の増加
- b) 接触摩擦物質の電気抵抗の増大
- c) 接触摩擦物質の材質に基因するもの

- 2) 火花放電を起させるような条件として

- a) 導体の非接地による電荷蓄積
- b) 尖鋭部分による電荷表面密度の増大
- c) 移動、回転等による絶縁帯電体の容量減少による電圧の上昇

- 3) 静電気火花による火薬への着火条件として

- a) 放電回路中の電気抵抗
- b) 火薬の粒度小なる場合及び粉じんになった場合
- c) 可燃性蒸気と空気の混合物のある場合

1例として熱風乾燥式の無煙火薬の溶剤回収装置の地面に相対する面積を  $S=10.0m^2$  地面との平均距離  $d=0.5m$  とすればその静電容量は  $C=1.11 \times S/4\pi d$  (P.F.) であるから約  $180 P.F.$  となる。この装置が絶縁されていて約  $1,100V$  に帯電していればそのエネルギーは約  $11mJ$  であり火薬を直接発火させるに必要なエネルギー約  $10mJ$  より大きい。(2.4項参照)そ

して適当な抵抗があれば火花放電により火薬に着火する可能性は充分ある。尚溶剤蒸気、粉じん等の着火エネルギーは無煙火薬より更に小さく危険度も大きい。従つて次報で粉じん、溶剤蒸気等の着火エネルギー、爆発限界等について報告し度い。(昭和34年4月27日工業火薬協会春季研究発表会で発表)。

#### 文 献

- 1) 植竹万太郎, 佐藤寛「無煙火薬の帯電に関する研究」第1報, 第2報工火投稿中
- 2) 斎藤隆二「火薬類の帯電に関する研究」火兵学会

誌, 第35巻, 昭17年

- 3) 北川徹三「安全工学から見た静電気」応用物理, 24巻, 10号 (1955)
- 4) 粉じん燃焼とその防止対策, 労働省産業安全研究所資料
- 5) 植竹万太郎, 佐藤寛「無煙火薬の帯電に関する研究」第1報, 工火投稿中
- 6) 千谷利三「燃焼と爆発」桐書店, p. 59
- 7) 植竹万太郎, 佐藤寛「無煙火薬の帯電に関する研究」第1報, 第2報工火投稿中

## On the Ignition of Smokeless Powder by Electrostatic Discharge

Mantaro Uetake and Hiroshi Sato

The ignition of smokeless powder by electrostatic spark has been studied, as the continued paper to our last one. The outline of our experiments are as follows.

1) Electric resistance is required in circuits of discharge to cause the ignition of the powder, but too high resistance can't ignite the powder, there being an optimum value of resistance to ignite the powder. If the spark voltage is high, the range of resistance to ignite the powder becomes wider.

2) The energy to ignite the powder is larger than that for gas. The minimum energy was measured to be about 10 millijoule for ignition of the powder.

3) Experiments show that the minimum electrostatic voltage for ignition is about 800 volt, and the lesser voltage can not ignite the powder.

4) The form of electrode affects the probability of ignition of the powder and the sharp one, for example, decreases the ignition probability.

5) Ignition probability for small granulated powder is high and the larger the particle, the lower the probability.

6) It is easier to ignite the double-base propellant by electrostatic spark than for single-base one, and it is very difficult to ignite the powder coated with graphite.

The mechanism of ignition of the powder was considered: firstly the powder is decomposed by spark and produces the ignitable gases, then the ignition of gas occurs, and the flame burns the solid propellant. Accordingly to ignite the propellant, the minimum time and space is required to produce the inflammable gases and followed burning.