

起爆薬類の反応性 (第6報)

電流及び火焰に対する感度

山 本 一 元*

1. 緒 論

前報では、全体加熱による発火についてのべたが、実用上の起爆薬への点火は、電気雷管や工業雷管に見られるように、瞬間的なエネルギーを与えて点火薬や起爆薬を発火させる例が多く、本報ではこうしたライフの短い熱源に対する起爆薬類の感度についてのべる。

電橋による点火については、既に古くから研究されており、Beyring, Drekopf¹⁾は、次式に示す点火力積の式を提唱し、近年までこれが広く用いられていた。

$$K = \int_0^t F dt = J \frac{TCdS^2}{\rho} \quad (1)$$

但し、 I ; 電流、 t ; 点火時間、 J ; 仕事の熱当量、 T ; 点火薬の発火点、 C ; 電橋の比熱、 d ; 電橋の比重、 S ; 電橋の断面積、 ρ ; 電橋の比抵抗

岡崎氏²⁾は、数多くの実験から上式を綿薬を点火薬とした電気雷管に適用し、コンデンサー放電による点火力積の測定方法を確立した。

日野氏³⁾は、Drekopf 式が熱損失と点火薬の発火遅れと温度の関係を無視している点を修正し、Drekopf の1項式のかわりに2項式を提唱し、疋田、坂巻、三井氏の実験値により、この成立をたしかめた。

又、Jonese^{4) 5)}等は、熱爆発理論の考えに基づいて発火の条件式を導き、多くの系統的な実験によつてその成立をたしかめ、木下氏⁶⁾は、Jonese と同様な手法から電橋による点火に対して函数関係を導いている。

本報では、ロダン鉛—塩素酸カリ混合物を点火玉として用いて主に実験を行ない、電流感度の測定方法を検討し、更に種々な起爆薬類の感度を測定した。

コンデンサー放電を利用する場合には、点火エネルギーは尖頭電流が大きくなるに従つて見掛上小さくなる。

電橋点火では全体加熱と異り、特に局部的な加熱に

よつて反応が生起され、点火時間は非常に短いため、感度の序列は、緩慢な加熱によつて求めた値と異つてくる。

この外、雷管にあつては、起爆薬への点火は導火線や、点火玉の火焰によつて行なわれるものであるから、各種起爆薬の導火線の終発火焰に対する感度も比較した。

こうしたライフの短い火焰に対する感度は電橋による点火と類似した傾向を示す。このように、熱感度については理論的にも多くの仮定を設けて一応確立されているが、実際には全ての感度に対して普遍的な加熱によつて反応が開始される熱機構は起爆薬の反応生起の本質的な究明及び、工業生産上の応用にも必要欠くべからざるものであるため、特に実験的な面を主体に検討した。

2. 実 験

2.1 試 料

2.1.1 起爆薬その他

雷汞、DDNP、テトラセン、トリニトロレゾルシン鉛、ロダン、塩素酸カリはいずれも前報と同様な試料を用いた。

雷汞はチオ硫酸ソーダ法によつて定量した純度は、98.6%、DDNP は窒素量 26.60% のものを用いた。

電橋点火では、電橋と起爆薬類との接触によつて見掛上の態度が異なるため、雷汞、トリニトロレゾルシン鉛、ロダン鉛、塩素酸カリはいずれも粉碎して100メッシュ通過のものを使用した。

2.1.2 点 火 玉

芯線径 0.45 mmφ の銅線に、径 0.03 mmφ の $Pt-Ir$ 合金線をハンダによつて、線長約 1.55 mm となるように架し、起爆薬量に対して、約 3% の硝化綿 (窒素量 11.8%) をバインダーとして用いて、約 8~10 mg 電橋周辺に塗布した。電橋抵抗は、0.55~0.60 Ω に規制して試料とした。

2.1.3 火焰感度測定用試料

内径 6.0 mmφ、深さ 10 mm の銅管体に、起爆薬 0.2~0.3 g を約 100 kg/cm² の圧搾圧で充填して試料とした。

昭和39年2月13日受理

* 旭化成火薬事業部 (九州工大) 北九州市戸畑区中原

2.2 実験装置及び方法

2.2.1 点火力積の測定

Fig. 1 の回路によつて点火力積を測定した。即ち、 S_1 を閉じたとき、コンデンサーに蓄積されるエネルギーは、 S_1 を閉じた後の任意の時刻の電流を i_1 、コンデンサーの容量を c 、電荷量を q とすると、その端子電圧 V_c は、

$$V_c = q/c \quad (2)$$

となり、 i_1 に対する抵抗 R_1 中の電圧降下は、 $R_1 \cdot i_1$ であるから、電圧 E に関して次式が得られる。

$$\begin{aligned} E &= R_1 \cdot i_1 + V_c \\ &= R_1 \cdot i_1 + q/c \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $i_1 = dq/dt$ であるから

$$E = R_1 \frac{dq}{dt} + \frac{1}{c} \cdot q \quad (4)$$

となり、これを解くと

$$i_1 = \frac{E}{R_1} \exp\left(-\frac{t}{R_1 \cdot c}\right) \quad (5)$$

$$V_c = E \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{R_1 \cdot c}\right) \right\} \quad (6)$$

となり、コンデンサーに蓄積されたエネルギー W は、

$$\begin{aligned} W &= \int_0^\infty i_1 \cdot V_c dt \\ &= \int_0^\infty \frac{E^2}{R} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{R_1 \cdot c}\right) \right\} \exp\left(-\frac{t}{R_1 \cdot c}\right) dt \\ &= cE^2/2 \end{aligned} \quad (7)$$

となる。次に、 S_2 を閉じたとき、 R_2 で消費するエネルギー W_R は、

$$W_R = \int_0^\infty i_2 \cdot R_2 dt = \frac{cE^2}{2} \quad (8)$$

但し、 $i_2 = \frac{E}{R_2} \exp\left(-\frac{t}{R_2 c}\right)$

となり、(7) 式と (8) 式とは全く等しいから、コンデンサーに蓄積されたエネルギーは全部 R_2 で熱エネルギーとして消費される。

従つて、点火力積 K には、

$$K = \frac{W_R}{R_2} = \int i^2 \cdot dt$$

であらわされるので、時間 t までに消費されるエネルギーは次式で与えられる。

$$\begin{aligned} K &= \frac{W_R}{R_2} = \int_0^t i^2 \cdot dt \\ &= \frac{cE^2}{2R} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{2t}{Rc}\right) \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

但し、 RC は時定数

実際の測定では、コンデンサーのエネルギーは瞬間的に回路に放電されるとして (9) 式の指数項を、無視して、見掛上の点火力積 K_0 を求めると次式が得られる。

$$K_0 = cE^2/2R \quad (10)$$

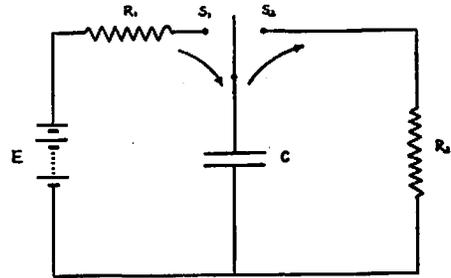


Fig. 1 Measurement circuit of the firing energy of the fuse head using electric discharge from condenser
 R_1 : Variable resistance
 R_2 : Resistance of fuse head
 S_1, S_2 : Switch
 C : Condenser
 E : Cell

2.2.2 定常電流による点火エネルギーの測定

コンデンサー放電を利用して実験する場合は、時定数を無視しているのので、一定値の電流を一定時間流電出来る「定電流一定時間装置」を製作して、点火エネルギーを測定した。

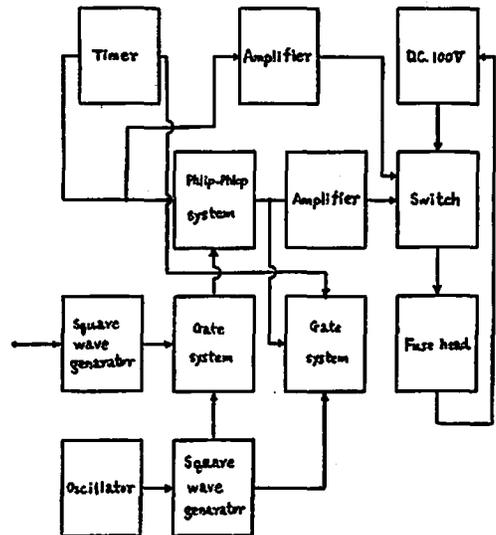


Fig. 2 Diagram of measuring circuit for excitation time of fuse head by steady current.

この装置のブロック・ダイアグラムを Fig. 2 に示す。0.5~10 amp. までの直流を 50 μ .sec 刻みに 50 m.sec まで通電出来るものである。

2.2.3 最大不点火電流, 最少点火電流の測定

常法に従つて, 各試料点火玉につき最大不点火電流, 最少点火電流, 臨界点火電流 (50% 発火の電流値) を測定した。

所定電流に対して, 夫々20回の試験を行ない, 電流と発火率曲線を求め, グラフより臨界発火電流を求めた。

2.2.4 火焰に対する感度⁷⁾

Fig. 3 に示す方法により, 綿巻2種導火線 (旭化成製品) を 20 cm の長さ に 切断して, 導火線 の一端より点火し, 終発火焰を銅管体内の起爆薬面に作用させ, 導火線の末端と, 起爆薬面の距離 x をかえて, 点火の有無を試験した。夫々の距離において各20回の試験を行ない, 距離と点火率の関係を求めた。

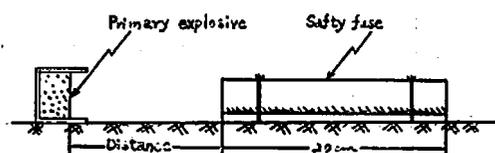


Fig. 3 Sketch of Bick Ford Fuse test for the primary explosives.

3. 実験結果並びに考察

3.1 尖頭電流と点火力積の関係

ロダン鉛-塩素酸カリ等量混合物を点火薬として点火玉をつくり, Fig. 1 の装置によつて尖頭電流を変えて点火力積を測定した。

Table 1 Relation between excitation energy and peak current of circuit.

Condenser; 30 μ F, D.C.; 360V
 Bridge wire; Diameter 0.03mm ϕ
 Length 1.55mm
 Resistance; 0.50~0.60 Ω
 Priming composition;
 Pb(SCN)₂(5):KClO₃(5)

Current (Peak) (Amp.)	Time constant (m. sec)	Excitation energy (mws/ Ω)
9.0	0.00	2.33
6.5	0.12	2.45
3.7	0.40	2.85
3.0	0.75	3.12
2.2	1.4	3.40
1.6	4.1	5.10

直流電源は, 富士電機製積層乾電池 (90 V/個) を4個使用して, 360 V とし, コンデンサー容量は 30 μ F を使い, 抵抗 R_i を変えて尖頭電流を調整した。結果を Table 1 に示す。

上表から明らかなように, 尖頭電流が小さくなるにつれて, 点火力積は大きくなる。このことは, 電流値が大きくなるにつれて時定数が長くなり, 見掛上のエネルギーは大きくなることと, 熱損失が無視できないことを示すものである。

3.2 定常電流による点火エネルギーの測定

前記したと同様な点火玉を用いて, Fig. 2 の装置によつて点火エネルギーを測定した。電橋に所定の電流を一定時間流電し, それ以後電流を断つても点火薬が発火する場合を点火エネルギーとした。この結果を, Fig. 4 に示す。

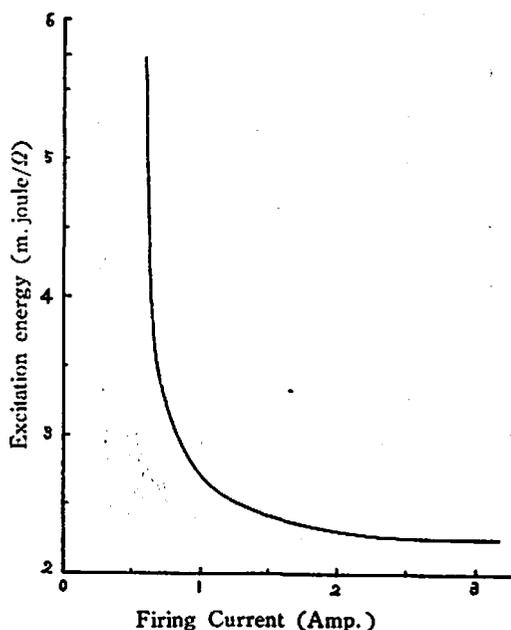


Fig. 4 Relation between excitation energy and current for the lead thiocyanate-potassium chlorate fuse head.

Bridge wire; Pt-Ir, 0.03mm ϕ \times 1.55mmL
 Resistance; 0.55~0.60 Ω

グラフから明らかなように, 電流値が小さくなるに従つて, 熱損失が大きくなり, 見掛上点火エネルギーは大きくなる。

今仮に, 単位抵抗の電橋に電流を通じ, 点火薬が時間 t の後に発火したとすると, その間に電橋に発生したエネルギーを K とすると,

$$K = \int_0^t i^2 dt \quad (11)$$

となり、定常電流では、

$$K = I^2 t \quad (12)$$

となる。今、質量 m 、平均比熱 c の電橋を T_0 から T まで温度上昇させるに要するエネルギーを Q_1 とすると、

$$Q_1 = mc(T - T_0) \quad (13)$$

電橋抵抗 R をとし、定常電流 I を t 時間通じるさいに発生するエネルギーを Q_2 とすると、

$$Q_2 = I^2 \cdot R \cdot t \cdot J^{-1} \quad (14)$$

但し、 $J = 4.185 \text{ joule/cal}$

となる。

(13) 式の T を点火薬の発火点とすると、点火玉の発火する条件は次式が成立する場合である。

$$Q_1 \leq Q_2 \quad (15)$$

従つて、熱損失を全く考えない場合の、発火限界の点火力積は、(11)、(12)、(13)、(14) 式より、

$$K = Ft = J \frac{S^2 Cd (T - T_0)}{\rho} \quad (16)$$

但し、 S ；電橋の断面積

d ； " 密度

C ； " 平均比熱

ρ ； " 比抵抗

で与えられ、 T_0 をゼロとすると、Drekopf の式 (1) に一致する。

(16) 式から明らかなように、点火力積が点火薬の発火点、電橋の材料、断面積によつて変化するものである。

実際には、電橋に発生するエネルギーは脚線、冷点火薬層に熱損失となつて逃散するため、見掛上の点火力積は、真の点火力積値よりも大きくなる。

点火過程のエネルギーの移動についてみると、電橋に時間 t より dt 時間通電したときに発生するエネルギーを dQ とし、電橋の熱容量を C' 、時間 t に於ける電橋温度を T とし、熱損失項の平均熱伝導率を A とすると、

$$dQ = A \cdot T dt + C' dt \quad (17)$$

が成立し、時定数に關係する測定上の誤差と同様に、熱損失が大きいウエイトを占める。

電橋に無限大の時間流電して発火しないことは、単

位時間内に電橋に発生するエネルギー q_0 、逃散するエネルギーを q_1 とすると、次式が成立する場合である。

$$Q_c \leq \int_0^{\infty} (q_0 - q_1) dt \quad (18)$$

但し、 Q_c は発火の臨界エネルギー
点火する条件は、

$$\int_0^{\infty} (q_0 - q_1) dt - Q_c \geq 0 \quad (19)$$

となり、この条件を満足する場合には点火薬は発火することになる。

3.3 発火遅れを加味したときの感度

火薬類の熱分解速度は、Arrhenius の式より

$$L_n k = -E/RT + C \quad (20)$$

但し、 k ；速度恒数、 E ；活性化エネルギー

R ；気体常数、 T ；温度 ($^{\circ}\text{K}$)

C ；恒 数

となり、 τ を発火遅れとすると、同一温度に於いてはその反応速度は、発火遅れに逆比例するから、

$$k \propto 1/\tau \quad (21)$$

となり、従つて

$$L_n k = E/RT + C' \quad (22)$$

となり、ロダン鉛一塩素酸カリ混合物について T と τ との關係を求めると、Table 2 のようになる。

Table 2 Relation between temperature ($^{\circ}\text{C}$) and induction periods for the priming composition of lead thiocyanate-potassium chlorate mixture

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Induction period (sec)
220	0.9
210	2.4
200	6.1
190	15.3

この値から、 $1/T$ と $L_n \tau$ とを求めて (22) 式に代入すると、

$$L_n \tau = 2.04 \times 10^4 / T - 41.3304 \quad (23)$$

となり。

$$\begin{aligned} \tau &= \exp(2.04 \times 10^4 / T - 41.3304) \\ &= 1.1239 \times \exp(2.04 \times 10^4 / T) \times 10^{-18} \quad (24) \end{aligned}$$

となる。

今、ある電橋に通電したときの熱バランスを考えると、 i を電流、 R を電気抵抗、 t を通電時間、 L_t を t 時間通電したときの熱損失、 c, m を夫々電橋の比熱、質量、 T_1 を t 時間通電したときの電橋温度、 T_0 を電橋の初期温度とすると、

$$i^2 R t - L_t = c \cdot m (T_1 - T_0) \quad (25)$$

従つて、 $(T_1 - T_0)$ に要する時間は

$$t = \frac{c \cdot m (T_1 - T_0) + L_t}{i^2 \cdot R} \quad (26)$$

となる。

電気雷管の点火玉は、電橋の温度 T_1 になつたとき、 τ_{T_1} の発火遅れで発火するので、熱損失項 L_t を考慮すると共に、発火遅れを加味しなくてはならない。

$T = T_1$ になる迄の時間を t_{T_1} とし、回路の切断される時間を t_c とすると

$$t_{T_1} + \tau_{T_1} \leq t_c \quad (27)$$

の関係が成立するとき点火玉は発火する。

白金電橋の溶断温度を、 $1,770^\circ\text{C}$ とすると

$$\tau_{T=1770^\circ\text{C}} = 2.541 \times 10^{-14} \text{ sec}$$

となるので、(27) 式は、(24)、(26) 式より、 A, B を夫々常数とすると、

$$A \exp\left(\frac{B}{T_1}\right) \leq \frac{cm(T_c - T_1) - (L_{T_c} - L_{T_1})}{i^2 R} \quad (28)$$

となる。

高電流の場合には、(28) 式の $(L_{T_c} - L_{T_1})$ の項は小さくなるので、

$$A \exp\left(\frac{B}{T_1}\right) \leq \frac{cm(T_c - T_1)}{i^2 R} \quad (29)$$

を満足すれば、通電中に発火することになる。

3.4 熱損失に関する考察

点火玉にどれだけのエネルギーを賦与したら発火するかを測定することは重要であるが、実際には熱損失が無視できず、且又、点火薬の発火遅れは温度によつて異なるため、完全な理論式を設定することは、既にのべたように多くの困難を伴う。

高電流の場合には前節で考察したように、熱損失は無視できるが、低電流では熱損失が大きい割合を占める。

0.03mmφ の Pt-Ir 合金線を電橋に使用したときのロダン鉛-塩素酸カリ混合物の、点火エネルギーと

点火時間の関係をグラフに示すと、Fig. 5 のようになる。

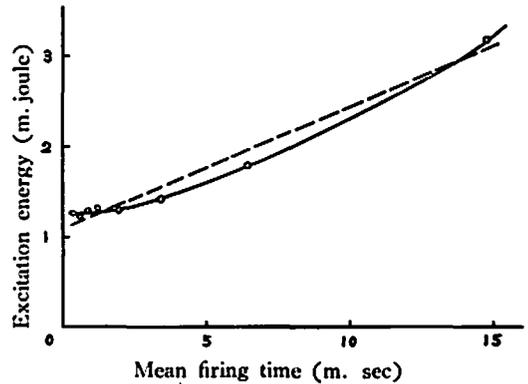


Fig. 5 Excitation energy as the function of mean firing time for the priming composition of the lead thiocyanate-potassium chlorate mixture.

Jones は、点火エネルギー E は、

$$E = A + Bt \quad (30)$$

但し、 t ; 点火時間、 A, B ; 夫々常数であらわされることを実験によつて確かめている。

即ち、点火エネルギー E は、熱損失項 Bt と一次式の関係にあるとしているが、厳密には一次式は成立しない。勿論、Jones の実験は、点火時間が $5 \sim 50$ m. sec と云う、電気雷管の実用電流域よりも遙かに小さい値であるので、Fig. 5 も一次近似として (30) 式の A, B を求めると、

$$E = 1.18 + 0.14t \quad (31)$$

となる。

ともあれ、この結果から明らかなように、点火エネルギーは、点火時間が長くなるにつれて大きくなり、時間の函数として熱損失を考えることは、実用上妥当であろう。

電橋の温度を測定することによつて、熱損失は与えられた全エネルギーを計算して求めることができるが、与えられた全エネルギー E 、電橋を所定温度に加熱するに要するエネルギーを E_0 、点火薬や脚線に失われるエネルギー E_i とすると、

$$E = E_0 + E_i \quad (32)$$

が成立する。

種々な電流値について、点火の条件が定まつたときの電橋温度を測定し、 E_0, E_i を求めたものが Table 3 である。

Table 3 Temperature of the bridge wire and the energy balances as the function of firing currents for the priming composition of lead thiocyanate-potassium chlorate.

Current (Amp.)	Excitation time (m. sec)	Temperature (°C)	E_i (m. joule)	E_b (m. joule)
0.62	14.84	296	0.95	2.07
0.70	6.35	301	0.84	0.81
0.93	3.12	347	1.05	0.38
1.58	1.07	368	1.11	0.31
1.99	0.65	380	1.18	0.18
2.34	0.45	395	1.20	0.10
3.10	0.29	426	1.32	0.16

このように、点火の条件を決定するときの電橋温度は、電流値によって異なり、電流値が大きくなるにつれて高い値となる。

熱損失項 E_i についてみると、高電流になるにつれて小さくなり、通電電流が 2.0 amp を越える附近から、全エネルギーに対する比率に小さくなるのが明らかになった。

3.5 各種点火薬の点火エネルギー

電橋の条件を一定にして、点火薬の種類によって点火エネルギーがどのように変化するかを調べた。

ロダン鉛一塩素酸カリの等量混合物、DDNP、テトラセン、トリニトロロズルジン鉛、雷汞（粉碎）をバインダーによって電橋周辺に塗布して点火玉をつくり、点火薬の種類によって点火エネルギーがどのように変化するかを調べた。

電橋は、0.03 mmφ の Pt-Ir 線を銅線に架し、電橋抵抗を 0.55~0.60 Ω に規制した。点火力積を測定した結果を Table 4 に示す。又、この表には、恒温加熱によって求めた発火点（発火遅れ、5 sec のときの炉温も参考までに記載した。

Table 4 Excitation energies and ignition points of various primary explosives.

Condenser; 30μF, Voltage; 100V

Primary explosive	Excitation energy (mws/Ω)	Ignition point (5 sec. delay, °C)
Hg(ONC) ₂ (powder)	3.90	204
DDNP	3.26	176
Tetracene	2.42	147
Lead Styphnate (powder)	3.76	292
Pb(SCN) ₂ -KClO ₃	3.63	205

この表から明らかなように、全体加熱の場合の熱感度と点火力積とは厳密には比例しない。例えば、ロダン鉛一塩素酸カリと雷汞とは、ほぼ同一の発火点であるにも拘らず、点火力積は雷汞の方が若干大きくなる。

これは、自立燃焼の生起が、ロダン鉛一塩素酸カリでおこり易いが、反応速度は雷汞に比較して緩慢であることにほかならない。

又、「定電流一定時間装置」によって、電流値と点火エネルギーの関係を求めると、Fig. 6 のようになり、いずれの場合にも、低電流になるにつれて点火エネルギーは大きくなって来る。

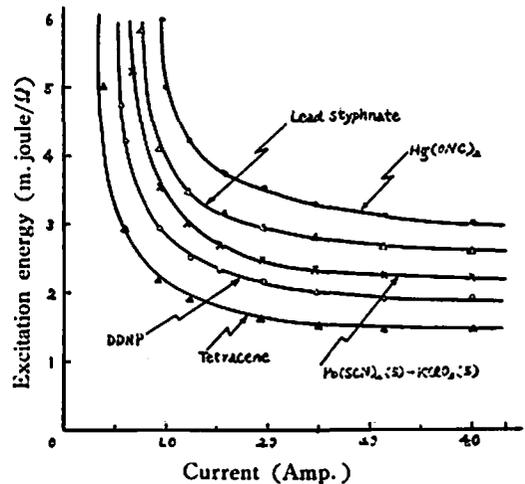


Fig. 6 Excitation energy of various fuse heads as the function of the firing current.

Bridge wire ; Pt-Ir. 0.03 mmφ × 1.55 mmL
Resistance ; 0.55~0.60 Ω

電橋による点火では、起爆薬類の本質的な熱感度のほかに、電橋と起爆薬類の接触状態が熱の移動に重要な要因となり、雷汞、トリニトロロズルジン鉛のような粗結晶をそのまま用いるときには、電橋と起爆薬の間に空気が介在して、熱の有効な移動を防止するため本実験には、いずれも粉碎したものを用了。

3.6 最大不点火電流、最小点火電流の測定

起爆薬類の電橋点火の感度を調べる簡単な方法として、最大不点火電流と最小点火電流を求める方法があり、各電流値に於ける起爆薬類の発火率をプロットしてゆけば、その精度も大略の見通しをつけることが可能であつて、今日でも特に電気雷管の感度の指標として用いられている。

各種起爆薬類を用いて点火玉をつくり、各電流値について夫々20個の試料から、発火率曲線を求めにものが Fig. 7 である。

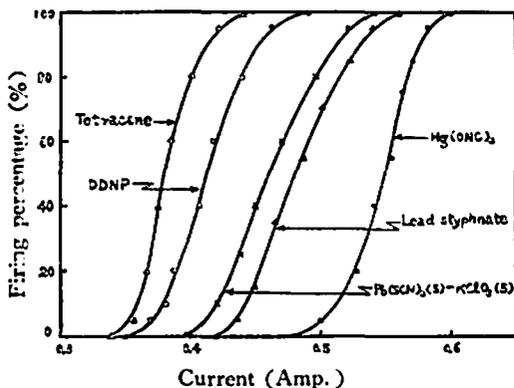


Fig. 7 Relation between firing percentages of various fuse heads and firing currents.
 Bridge wire; *Pt-Ir*. 0.03 mm ϕ \times 1.55 mmL
 Resistance; 0.55~0.60 Ω

このグラフをもとにして、最大不点火電流、臨界点火電流(50% 発火の電流値)、最小点火電流を表示したのが Table 5 である。

Table 5 Sensitiveness of various primary explosives for the firing current.

Primary explosives	Non firing current. (Amp.)	Critical firing current. (Amp.)	Complete firing current. (Amp.)
Hg(ONC) ₂ (powder)	0.46	0.55	0.60
DDNP	0.35	0.41	0.49
Tetracene	0.34	0.38	0.44
Lead styphnate(powder)	0.42	0.48	0.56
Pb(SCN) ₂ -KClO ₃	0.40	0.45	0.54

点火精度の点からは、最大不点火電流と最小点火電流の範囲が小さい方が望ましい。電橋による点火は、熱伝導による熱損失が重要な要因となり、全体加熱による反応生起とは根本的に異っている。

又、臨界発火電流で各種起爆薬の感度を比較しても点火エネルギーの序列と同一となる。

3.7 塩素酸カリを混入した DDNP の感度

DDNP に塩素酸カリを重量比で 1:1 に混合する場合には、発火遅れ 5 sec のときの発火点は、単独の場合 176°C であるものが、塩素酸カリを混入することによって 162°C に低下する。

DDNP と塩素酸カリの配合比をかえて点火玉をつくり、発火率-電流梅線を求めると、Fig. 8 のようになる。又、このグラフから、臨界発火電流と塩素酸カリの混合率の関係を求めると、Fig. 9 のようになる。

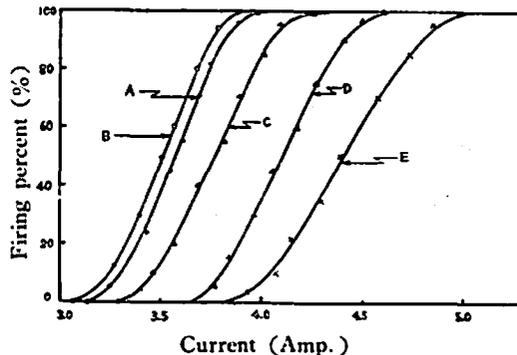


Fig. 8 Firing percentages of the priming compositions of diazodinitrophenol-potassium chlorate mixture as the function of current.

DDNP:KClO₃ (weight ratio) A. 1:0, B. 2:1, C. 1:1, D. 1:2, E. 1:3,

Bridge wire, *Pt-Ir*. 0.03mm ϕ
 Resistance, 0.55~0.60 Ω

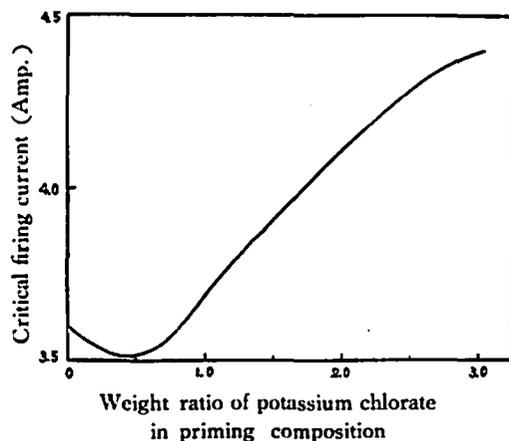


Fig. 9 Critical firing current of diazodinitrophenol and potassium chlorate mixture as the function of mixing ratio (weight) of potassium chlorate.

Bridge wire; *Pt-Ir*. 0.03 mm ϕ .
 Resistance; 0.55~0.60 Ω

グラフから明らかなように、塩素酸カリが DDNP 1 に対して、重量比で 0.5 混入された場合、電流感度が最も鋭感になり、1.0, 1.5 と増加するにつれて、DDNP 単独よりも鈍感になって来る。この結果は全体加熱の感度と異っている。

電橋による点火では、電橋周辺の起爆薬がまず分解

し、点火玉全体を発火させるに充分な状態をとる。

このように初期の反応は、DDNP によつてもたらされ、塩素酸カリの混合率が、0.5 附近までは塩素酸カリとの接触点において、DDNP の分解に遅れて塩素酸カリの分解を生起するが、限界量を越えると DDNP の分解によつて、塩素酸カリを分解を促進させるに到らず、塩素酸カリと DDNP の相互の反応によつて発火反応へと進展する。

即ち、初期の過程では DDNP が重要な役割を果たすが、系全体を発火させるに到る伝播の過程では、塩素酸カリと DDNP の反応が重要になってくる。電橋による点火のように、局部的に瞬間的なエネルギーが与えられる場合には、DDNP と塩素酸カリの反応を促進するのに必要なエネルギーが DDNP の分解によつて発生するエネルギーによつてもたらされ、且又、エネルギーの逃散も激しいため、全体加熱の場合に比較して、初期の分解をつかさどる DDNP が過剰の範囲で、鋭感性を示すものと推論される。

3.8 火焰に対する感度

2 種導火線を用いて、起爆薬の火焰に対する感度を試験した。導火線の末端から、起爆薬面の距離と発火率をグラフにしたものが Fig. 10 である。

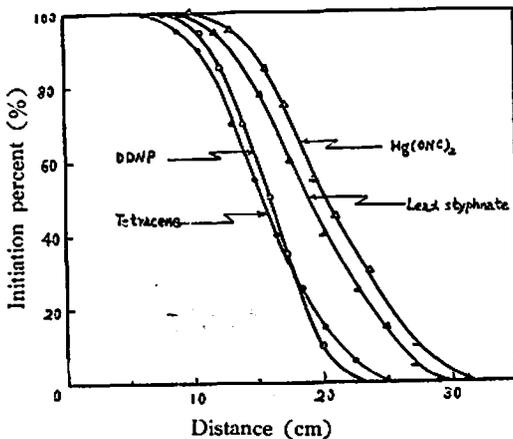


Fig. 10 Initiation percent of various primary explosives as the function of distance in Bick Ford Fuse test.

起爆薬が 100% 発火する距離を完全点火距離、全く発火しない距離を完全不点火距離、50% 点火される距離を臨界点火距離と定義して、この関係を表示したものが、Table 6 である。

臨界点火距離、及び完全点火距離では、感度は、テトラセン、DDNP、トリニトロレゾルシン鉛、雷汞の順になり、完全不点火距離では、テトラセンDDNP、雷汞、トリニトロレゾルシン鉛の序列となる。

臨界点火距離で感度の序列を定めると、全体加熱では、発火点の低い雷汞の方が発火点の高いトリニトロレゾルシン鉛よりも鈍感になり、電橋点火の感度の序列と一致している。

Table 6 Sensitiveness of various primary explosives for the spit of safety fuse.

Primary explosive	Non firing distance (cm)	Critical firing distance (cm)	Complete firing distance (cm)
Hg(ONC ₂) ₂	25	15.7	6.0
DDNP	29	19.0	8.0
Tetracene	31	20.0	9.2
Lead Styphnate	22	16.1	7.5

塩素酸カリ等の酸化剤を加えることによつて、発火点は、雷汞ではやや鈍感になり、DDNP では鋭感になるが、火焰に対する感度を前記したと同様な方法で試験して、臨界点火距離と比較すると、Table 7 のようになる。

Table 7 Sensitiveness of priming compositions for the spit of the safety fuse.

Primary explosive	Critical firing distance (cm)
Hg(ONC ₂) ₇ :KClO ₃ (3)	16.2
DDNP(5):KClO ₃ (5)	18.6

この場合、雷汞では若干鈍感になり、DDNP では鋭感になる。

このように火焰に対する感度を導火線の終発焰によつて求めることは、導火線の終発焰自体が安定したものでなく、微少な差の検出には不適當であるが、大略の比較は可能である。

この外、測定上では、起爆薬の露出面の状態も影響を及ぼし、未圧搾の場合には圧搾したものに比較して見掛上の感度は若干鋭感になるが、150 kg/cm² 以上の圧力で圧搾する場合には、3,000 kg/cm² まで殆ど差は認められなかつた。

4. 総 括

瞬間的なエネルギーを賦与したときの起爆薬類の発火性について、電橋点火及び火焰による点火について研究した。

電橋点火では、一般に電流値が大きくなるに従つて見掛上の点火エネルギーは低下する。これは、電流値が小さくなるにつれて冷点火薬層又は、脚線等に失われるエネルギーが大きくなることに外ならない。

電橋及び、火焰による点火では、感度の序列は鋭感なものから、テトラセン、DDNP、ロダゲル鉛一塩素酸カリ、トリニトロレゾルシン鉛、雷承の順となる。

電橋、火焰による点火では、全体加熱と異り局所的なエネルギーによつて、反応が生起されるもので、感度の序列も多少異つてくる。定速加熱、発火遅れを測定して求めた感度は、トリニトロレゾルシン鉛に比較して、雷承の方が鋭感であるが、電橋点火や火焰点火では殆ど同一の感度を示す。

全体加熱は、エネルギーの与え方が、分又は秒のオーダーであつて、電橋点火に比較すると非常に緩慢であつて、トリニトロレゾルシン鉛のような連鎖状の構造を持つ起爆薬では⁹⁾、与えられたエネルギーによつて全体に熱振動がおこり、エネルギーが系全体に比較的均一に分配されるので、多量のエネルギーが与えられても、分子は安定な状態を保ち発火点は高く活性化エネルギーも大きくなる。

瞬間的に高エネルギーが与えられる場合には、加熱源近傍の起爆薬層のみがエネルギーの高い状態に励起されて、この点が活性中心となつて系全体を発火に導くため、電橋点火や、ライフの短い火焰に対する感度が鋭敏になるものと推論される。

雷承や DDNP のような単分子の起爆薬は、全体加熱の場合も直ちに熱振動を生起し、分子の分解ははやく行なわれる。

DDNP に塩素酸カリを混入したものでは、第 3 報で考察したように、DDNP の分解生成物と塩素酸カリとの反応が行なわれ易いが、電橋点火では、極局的なエネルギーの賦与に対して、塩素酸カリとの反応を

行なうに充分な分解生成物が得られず、且又、初期反応の生起が、DDNP の分解によつて行なわれるため、完全酸化反応を仮定した場合の配合よりも、DDNP の量が多い場合の方が鋭感性を示すことになる。

以上のことから、起爆薬類を工業的に応用する場合には、その目的によつて、起爆薬の性質及び反応性を重視して決定することが望ましい。

追記；本研究を行なうにあたり、御指導を賜つた旭化成火薬事業部、東島技術部長、秋光氏、大久保雷管工場長、鈴木係長、実験に協力された樋口氏、計器の設計、計測に協力された、工務部、後藤氏、結果を検討していただいた九州工大、吉田教授、長田助教授に対して厚く御礼申しあげる。

文 献

- 1) K. Drekopf und C. Beyling, "Sprengstoffe und Zündmittel." p. 204 (1936)
- 2) 岡崎一正, 工火誌, 9, 110 (1948); *ibid.*, 10, 169 (1949); *ibid.*, 11, 195 (1950); *ibid.*, 12, 134 (1951)
- 3) 日野熊雄, *ibid.*, 11, 178 (1950)
- 4) E. Jones, Proc. Roy. Soc., A198, 523 (1949)
- 5) H. P. Staut, Nature (London), 166, (1950)
- 6) 木下四郎, 工火誌, 15, 2, 162 (1954); *ibid.*, 17, 89, 94 (1956)
- 7) A. R. Ubbelohde and P. Woodward, "The Sensitiveness of Explosives." p. 222, Engineering Library, 1948
- 8) 鈴木明, 工火誌, 14, 142 (1953)

Behaviours of Primary Explosives. VI.

"The ignition of Primary Explosives by hot wire and flash."

Kazumoto Yamamoto*

The present paper described an investigation of the behaviours of primary explosives affecting their ignitions by heated filaments embedded in the medium and the flash from safety fuse.

The filaments were composed of fine Pt-Ir resistance wire and were heated electrically, the critical thermal energy required to cause ignition being measured for various primary

explosives.

For a given ignition system, the heat supplied to the ignition system always equals the heat gained by the system plus the heat lost the absence of any term respecting heat generated by chemical reaction being significant.

The increase in ignition energy with increasing time of ignition is wholly attributable

to the heat losses sustained by the ignition system during the heat process.

In the sensitivity measured for mercury fulminate, diazodinitrophenol, lead thiocyanate-potassium chlorate, lead trinitroresorsin, and tetracene, their order (from higher to lower) is: tetracene, diazodinitrophenol, lead thiocyanate-potassium chlorate, lead trinitroresorsin, mercury fulminate.

This order is different from the order of sensitivity measured by uniform application of heat.

The primary explosives like as lead trinitroresorsin which is chain molecules structure is initiated easily by the instantaneous application of high energy. On the other hand, mercury fulminate and diazodinitrophenol which is mono molecule crystals show the same excitation by the different application of heat.

(* Research Laboratory for Ashahi Chem. Ind. Co. Ltd., and Department of Chemistry, Institute of Technology, Kyushu.)

爆 発 音 の 遮 蔽

名 和 小 太 郎*

1. 序 論

爆薬が自由面上またはその近傍にあるとき、その爆発によるエネルギーは、弾性波として以外に、空中音として、周囲に伝播する。その空中音は爆源近辺の人体や構造物に各種の損傷をあたえる可能性をもつ。したがって、爆発音の制御は、すぐれて実践的な課題となる。

2. 空中衝撃波

この報告で問題とするものは、爆発音であるが、ここで、簡単に衝撃波にふれておく、このため、波頭圧 p についてかんがえている。いま、

$$s = (\rho - \rho_0) / \rho_0$$

なる量を密度 ρ (添字 -0 は波面前の状態をしめす) に対して定義すると、 s が大きい時に、

$$p/p_0 = (1+s)^\gamma \quad (1)$$

なる関係がある。ただし、 γ は比熱比である。これが衝撃波の場合である。

次に、 $s \ll 1$ とすれば、式 (1) は、

$$p/p_0 = 1 + \gamma s \quad (2)$$

となる。これが音波の場合である。

さて、爆源にちかい場合、または、装薬量が大さい

場合には、 s は相当に大きく、式 (1) が、成立する。

しかし、そうでない場合には、 s は小さく、式 (2) が成立する。Los Alamos Scientific Laboratory¹⁾ によれば、式 (2) の適用範囲は、 $p \leq 180\text{db}$ である ($0\text{db} = 2 \times 10^{-4} \text{ dyne/cm}^2$ である)。一方、Brode²⁾ の計算結果によれば、音圧が 180db になる点は、 $1,000 \text{ kg}$ の球状 TNT の空中爆発から 33m の距離においてである。ここで、相似則を利用すれば、音圧が 180 db になる臨界的な距離は、表 1 のようになる。

表 1

薬 量	臨 界 距 離
1,000 kg	33 m
100	15
10	7.5
1	3.3

したがって、通常の発破作業においては、衝撃波をとくに問題とすることはない。

3. 理論的考察

Cox et al.³⁾ および Cook⁴⁾ などによれば、爆発音は、その時の気象状態により、さまざまに変化しつつ伝播する。したがって、爆発音を制御する場合には、特に、これを爆源近傍において実施する必要がある。

爆発音の遮蔽については、覆土によるものが、もつ

昭和39年3月31日受理

* 旭化成工業技術研究所 東京都板橋区