

$$u(t) = \frac{2n^2}{3(3-2n+n^2)} \exp\left(-\frac{n\omega_0 t}{\sqrt{2}}\right) - \sqrt{\frac{2}{3-2n+n^2}} \exp\left(-\frac{\omega_0 t}{\sqrt{2}}\right) \sin\left\{\omega_0 t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{2}}{1-n} - 2 \tan^{-1} \sqrt{2}\right\}; t \geq 0$$

$$= 0; t < 0$$

and

$$\omega_0 = \frac{2\sqrt{2}V}{3a} \quad (3)$$

where  $\frac{\sqrt{2}}{n\omega_0}$ : time constant of exponential decay of shock wave,

a: radius of cavity,

V: propagation velocity of elastic wave.

As the shock wave zone and the shock wave in a blasting correspond to the cavity and the pressure wave in Sharpe's model, respectively, the radius of the shock wave zone and the shape of the shock wave in a blasting are evaluated from the comparison of the observed wave with Sharpe's wave.

The observed wave had better analyze in the expression of the frequency spectrum, for distortions of the shape of the wave, which are due to the interference of waves from multiple blasting chambers and filtering characteristics of measuring instruments, are reduced more easily in the expression of the frequency spectrum than in that of the time-varying wave. The reduction is given by

$$U(\omega)_{\text{obs}} = \frac{1}{F_1(\omega) \cdot F_3(\omega)} \cdot U(\omega)_{\text{obs}}^*$$

where  $U(\omega)_{\text{obs}}^*$ : spectrum of observed wave.

$U(\omega)_{\text{obs}}$ : corrected spectrum of observed wave.

$F_1(\omega)$ : characteristics of interference of waves from multiple blasting chambers,

$F_3(\omega)$ : filtering characteristics for measuring instruments.

An observation of the elastic wave is carried out for a coyote blasting, the charge of which amounts to 10,000kg distributing among 10 chambers.

The frequency spectrum for observed wave is calculated by Fourier analysis of the observed wave (Fig. 5) and that for Sharpe's wave is calculated by Fourier transformation of Eq. (1) (Fig. 6). By the comparison between both spectra, it is evaluated that the radius of the shock wave zone is 3.0~4.5m and the time constant of the exponential decay of the shock wave is over 0.02 sec.

(Technical Laboratory, Asahi Chemical Industry Co., Ltd.)

## 粉状点火薬の点爆特性

岡崎 一正\*

### 1. 緒言

電橋加熱による点火薬の発火あるいは点爆に関しては、従来、点火玉を対象とする研究が多く、その内、Jones等<sup>1)2)</sup>、木下氏等<sup>3)</sup>の報告では比較的が多薬種が取扱われている。筆者<sup>4)</sup>も既にテトラセン、DDNPをそれぞれ単味または配合主剤とする点火玉の性能について報告した。点火玉形式では薬剤の電橋への付着が堅固で、実用並びに発火機構の研究に便利な長所はあるが、他方において結着剤を使用するため、その種類や量によつて点火薬の分解発火性と燃焼性が

変化する。従つて薬種自体の電橋加熱に対する感度、点爆特性等を本質的に検討し、点爆過程を詳細に追究するには、結着剤の関与しない状態を対象とするのが理想的と考えられる。そこで比較的発火点の低いテトラセン、DDNP、雷汞、モノニトロゾルシン鉛(中性一水塩)、ロダン化鉛一塩素酸カリウム(50:50)混合薬等の微粉末について、一定の電橋及び装填条件下における発火性並びに電気雷管(瞬発)の点火薬としての点爆性を実験的に吟味し、点爆過程について考察した。また実験結果の検討に利するため、易爆性のアジ化鉛とトリニトロゾルシン鉛(中性一水塩)も用いた。ここでは主として点爆に関して報告する。

昭和37年4月19日受理

\*東京大学工学部燃料工学科

## 2. 試料

実験に使用した薬種の概略は次の通りである。

a) テトラセン：爪炭酸アミノグアニジンと  $\text{NaNO}_2$  との反応で得た白色微粉末。

b) DDNP：ピクラミン酸を塩酸の存在下に  $\text{NaNO}_2$  でジアゾ化した帯褐黄色針状結晶。

c) 雷汞：常法でつくった灰色雷汞を濃アンモニア水で精製した白色の純品。

d) モノニトロゾルシン鉛：Kauffmann等<sup>3)</sup>の方法で得た2-ニトロゾルシンを木下等<sup>3)</sup>と同様な処法によつて中性鉛塩とした赤褐色微結晶。

e) トリニトロゾルシン鉛：Stettbacher<sup>6)</sup>の方法でトリニトロゾルシンをつくり、次にZingaro<sup>7)</sup>の方法により中性鉛塩とした。

f) アジ化鉛：微量のゼラチン添加の微結晶集合体。

g) ロダゲン化鉛—塩素酸カリウム混合薬：ロダゲン化鉛と  $\text{KClO}_3$  の等量をメタノール湿潤の状態、ゴム乳鉢中で混合して乾燥したもの。

なお、白色雷汞とトリニトロゾルシン鉛の結晶は

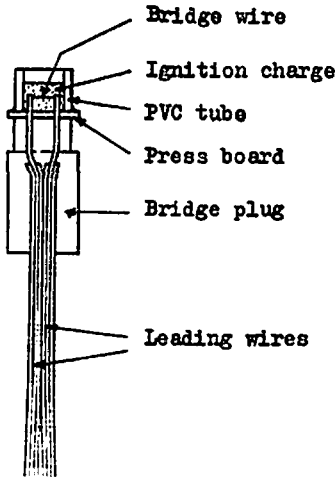


Fig. 1

Table 1

Ignition charge	Wt. of charge (mg)	Loading density
Tetracene	10	0.725
DDNP	8	0.58
Mercury fulminate	20	1.45
LMNR*	10	0.725
LTNR*	20	1.45
Lead azide	20	1.45
Lead thiocyanate/chlorate	20	1.45

\*LMNR=Lead mononitroresorcinate

LTNR=Lead trinitroresorcinate

やや大きく、電橋への接触固定が困難なため、平均粒径約  $10\mu$  に粉碎して用いた。

点火装置は Fig. 1 の如き構造で、点火薬を精秤して内径、高さ共 3mm の塩化ビニール管につめ、軽く圧して薬高を正確に 2mm として薬の占める容積、即ち電橋周囲の点火薬の形状寸度を一定に保たせた。従つて装薬量は薬種によつて異なり、それぞれの適量を Table 1 のように定めた。

電橋は直径 0.03mm、長さ 2mm、抵抗約  $0.7\Omega$  (常温) の通常の白金イリジウム線で、脚線の電橋接合端がビニール管内に 1mm だけ突出するように固定した。

## 3. 点爆時間

### 3.1 点火時間と点爆時間

点爆時間 (reaction time<sup>8)</sup>) は点火時間と共に電気雷管の斉発性と瞬発性を左右する特性値であるが、斉発性にとつて重要なものは電橋切断時間 (lag time<sup>9)</sup>) と点火時間との時間差である。正確な意味の点爆時間には雷管装薬の爆発までをとるべきであるが、電橋の切断が点爆薬の爆発によるときは、斉発性を論ずる場合に上記の時間差を点爆時間として取扱うことになる。

この概念の点爆時間は直接に電橋切断時間の測定から求められるが、電橋の焼断が点爆切断に先行する場合には、点爆時間の推定は外線切断または短絡法によらなくてはならぬ。

筆者は主として既報<sup>10)</sup>の如く、低電圧の直流電源を用い、電橋の抵抗変化に基づくオシログラムの点火電流波形上の折点 (変曲点) を点火薬分解速度の急増点とみなして、各個の試料につき単独に点火時間を測定すると同時に電橋の点爆切断時間から点爆時間を求める方法をとつた。

### 3.2 点火時間の測定値

点爆時間の推定には先ず点火時間値が必要であるので、各薬種につき、上記の直接法 (A法) で点火電流の初期値  $i_0$  が 0.5~3.0A の範囲にわたつて点火時間  $t_i$  を測定し、

$$\bar{i}^2 t_i = \int_0^{t_i} i^2 dt \quad (1)$$

として電流と点火時間との関係を求めた。Fig. 2 に  $t_i - \bar{i}$  曲線を示す。LMNR及びロダゲン化鉛混合薬 (以下ロダゲン薬と略称) の曲線はそれぞれ DDNP (曲線 2) 及び LTNR (曲線 4) に近接して両曲線の間に入るので図には省略した。

点火過程において、昇温による電橋の抵抗変化、点火薬発火層の分解による諸定数の変化、さらに点火時間、従つて加熱時間の大小による発火温度の変動など

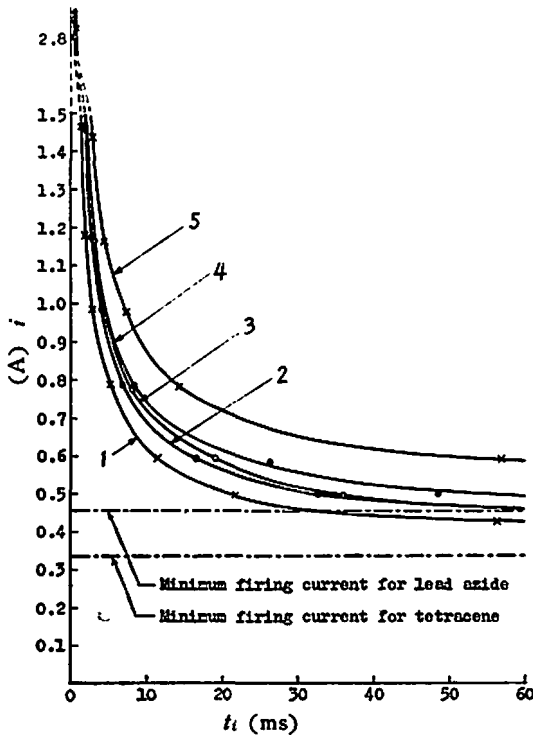


Fig. 2 Relation between firing current and excitation time.

1. Tetracene; 2. DDNP; 3. Mercury fulminate; 4. LTNR; 5. Lead azide

を考慮すれば、電流または点火エネルギーと点火時間との厳密な関係は求め難い。Altman等<sup>11)</sup>は Carslaw 及び Jaeger の熱伝導式の解を用いて入力と点火時間との関係を論じているが、上記の諸変化は考慮していない。Lewis 及び von Elbe<sup>12)</sup>は Jones のエネルギー式<sup>13)</sup>における点火エネルギーと点火時間との直線的關係は正確には成立しないことを示し、また Altman 等も熱伝達係数が点火時間と共に変化することを指摘しているが、ここでは  $t_i - \bar{i}$  曲線が最も簡単に近似的に

$$\bar{i}^2 t_i = a + b t_i \quad (2)$$

より

$$\bar{i} = \{(a/t_i) + b\}^{1/2} \quad (3)$$

で表わされるとし、実験値から  $a, b$  を電橋と点火薬とに関する定数として計算すれば Table 2 のようになる。 $t_i \rightarrow \infty$  に対応する電流が最小発火電流  $i_m$  で、(3)によれば

$$i_m \approx \sqrt{b} \quad (4)$$

となる。

(3) 式を点火時間の極めて大きい領域まで拡張使用することには疑問があるが、Table 2 に掲げた如く、

Table 2

Ignition charge	$a$ (mWs/ $\Omega$ )	$b$ (W/ $\Omega$ )	Minimum firing current (A)	
			calculated from eq. (4)	observed
Tetracene	2.58	0.118	0.344	0.337
DDNP	3.21	0.156	0.395	0.396
Mercury fulminate	3.79	0.141	0.375	0.359
LMNR	3.10	0.163	0.404	0.399
LTNR	3.71	0.183	0.428	0.422
Lead azide	5.07	0.247	0.497	0.457
Lead thiocyanate/chlorate	3.28	0.198	0.445	0.431

計算した  $b$  の平方根が最小発火電流の実測値に近いので、(3)は小電流域まで  $t_i - \bar{i}$  曲線の近似式として実用し得るものと認められる。

なお、Fig. 2 の鎖線はテトラセンとアジ化鉛の最小発火電流の実測値を示し、それぞれ曲線 1 及び 5 の漸近線となる。

アジ化鉛や LTNR の如き速やかに爆発に転移するものは、発火時に電橋を切断し、電流波形上に折点が認められないので、電橋切断時間を点火時間とみなした。従つて、かくして測定した時間と通電開始より点火薬の発火に必要な限界エネルギーが付与されるまでの時間、即ち通電時間制御法(B法)で推定される、いわゆる excitation time との関係を吟味するため、二、三の薬種について同一口の試料を用い、A法とB法とによる結果を比較した。この実験では、両法において同性質の電流が流れるように点火回路の条件を同一にし、A法では各回約20個の試料の平均値をとり、B法では試料数各100個でU-D法<sup>13-15)</sup>により、統計的に平均点火時間を推定した。その結果は Table 3 の通り

Table 3

Ignition charge	Firing voltage (V)	Firing current $i_0$ (A)	Mean excitation time (ms)	
			determined by	
			method A	method B
Lead thiocyanate/chlorate	4.11	0.8 1.2	7.16 2.59	7.15 2.59
DDNP	4.10	0.8	6.79	6.77
LTNR	4.09	0.8	8.18	8.08

で、A法による点火時間値は、電流波形の変曲開始点をとれば、B法による推定値とよく一致する。LTNRで電橋切断点をとつた場合にも発火から切断までの遅れは上表の結果から見て、測定した点火時間の絶対値に比して無視し得るので、過大電流以外では発火から爆発への転移期間の極めて短かい起爆薬については、

電橋切断時間を点火時間とみなしても、その誤差は実験誤差内にはいる。

### 3.3 雷汞爆粉に対する点爆時間

点爆薬が雷汞爆粉の雷管（工場製品）に対する点爆時間を、点火薬と点爆薬との対面距離を3mmとし、Fig. 3 (a)の回路で種々の点火電流について測定した結果を Table 4 に示す。

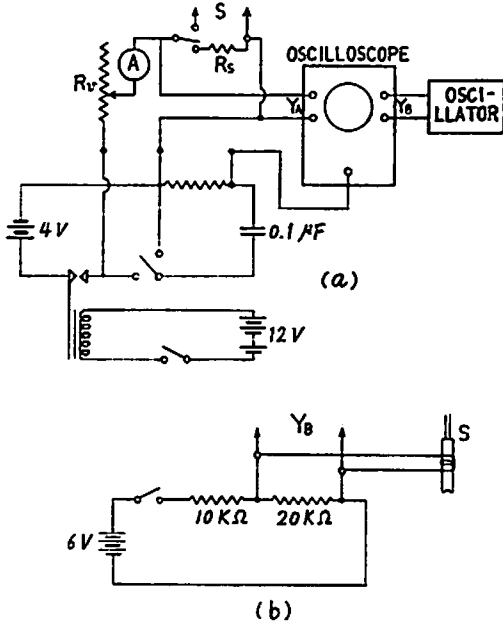


Fig. 3 Sketch of apparatus and circuitry for measuring the reaction time of electric detonator.

Table 4 Reaction time ( $\tau$ ) in milliseconds for priming charge of fulminate/chlorate composition

Ignition charge	$i_0$					
	0.6A	0.8A	1.0A	1.5A	2.0A	3.0A
Tetracene	3.98	4.05	4.00	3.94	(3.04)	(2.52)
DDNP	1.82	1.88	1.90	1.90	1.82	1.87
Mercury fulminate	0.98	0.95	0.96	0.94	1.08	1.05
LMNR	3.48	3.34	3.40	3.37	(2.83)	(2.35)
Lead thiocyanate/chlorate	1.95	2.15	2.10	1.82	2.04	2.03

電橋切断時間から点爆時間 $\tau$ が求められるのは、点爆切断が焼断などに先行することが明らかな場合、即ち焼断時間を $t_f$ とすれば

$$t_f \geq t_i + \tau \quad (5)$$

の条件が満足されるときに限る。

点爆切断と焼断との判別は外線切断法または短絡法

を併用すれば明瞭に行えるが、オシログラムの電流遮断波形からも推測され、点爆切断では電流の切り落ちが鋭く、焼断ではゆるやかである。 $\tau$ の短い薬種では、点火電流の初期値が3Aまでは電流波形から点爆切断と認められるが、 $\tau$ の長いテトラセンとLMNRとは2Aで点爆切断と焼断とがまざり、3Aでは完全に焼断のみと判定される。表中に括弧を付した数値は焼断が先行して点爆時間値とみなされないものである。さらに、Fig. 3 (b)の回路を同図(a)のオシロスコープの $Y_B$ 及び試料接続端子Sに接続して外線切断法を併用して上記の判定を確認した。

### 3.4 その他の点爆薬に対する点爆時間

点爆時間には、点火薬の電橋接触層が発火して燃焼波が点火薬内を進み、燃焼火炎または熱粒子が点爆薬面に到達してその端面層が発火し、点火薬よりのエネルギー伝達の強弱及び点爆薬の性質と装填条件によって定まる燃焼期間を経て爆轟に転移し、添装薬への伝爆と共に爆轟に伴う衝撃により電橋が破壊されるといふ諸現象が含まれる。従つて点爆時間には点火薬種のみならず点爆薬種による相違も考えられるので、異種点爆薬間において点爆時間に大差が生ずるか否かを吟味するため、下記の点爆薬に対する点爆時間を測定した。

	薬量(g)	装填圧(kg/本)
1. 雷汞単味	0.3	50
2. アジ化鉛	0.2	20
3. DDNP	0.2	100

その結果は Table 5 の通りで、点爆薬種の相違によつて1~4ms程度の点爆時間には有意差は現われない。従つて点火薬のみの関与する前段の過程に比すれば、点爆薬が関係する後段の過程は極めて短時間と推測される。

Table 5 Reaction time ( $\tau$ ) in milliseconds for priming charges other than fulminate/chlorate composition

Priming charge	Mercury fulminate	Lead azide	DDNP			
			0.6A	0.8A	1.5A	
Ignition charge	0.8A	0.8A	0.6A	0.8A	1.5A	
	Tetracene	4.10	4.18	4.36	3.87	3.50
	DDNP	1.84	1.95	1.82	1.88	1.90
	Mercury fulminate	0.95	—	0.90	0.92	0.83
LMNR	3.57	—	3.54	3.60	3.52	
Lead thiocyanate/chlorate	1.90	—	2.05	1.90	1.98	

### 3.5 考 察

点火時間は点火電流により(3)の関係に従つて若し

く変化するが、点爆時間に対しては、点火電流が過大でない領域では、Table 4 及び5に示したように電流の大小による影響は少ない。

点火電流の広範囲にわたる Jones等<sup>9)</sup>の測定結果によれば、電流の増大につれて点爆時間の短縮が示され、その結果に基づき、木下氏<sup>15)</sup>はある種の点火玉につき、 $i$ と $\tau$ との関係を表わす実験式 $\tau=1.59i^{-0.3}$ を導いた。点爆時間のこの短縮は、電流の増大による加熱速度の増加に伴ない、点火薬の初期燃焼が加速されることで定性的に説明されよう。また、点火玉では内外層の温度差が急速に生じて、その被膜の破壊が促進されることも考えられる。しかし、粉状薬の実験結果では1.5A以下、また Jones等の結果でも1A以下では点爆時間はほぼ一定とみなされる。

さらに強い電流では、電橋の焼断が先行するので、点爆時間は電気雷管の奇発性に無関係となり、焼断時間と点火時間との時間差が有用となる。

伊藤氏等<sup>17)</sup>は50A以上の大電流では断線に伴なうアーーク放電により点爆薬への直接点火の傾向が強くなることを指摘した。このような大電流では点爆時間は点火薬種に無関係である。

点爆以外の電橋切断には、電流のジュール熱に点火薬の燃焼熱が附加されることによる融断、あるいはさらに燃焼ガス圧の作用が加わることによる切断の促進があり、電流の弱いときは燃焼熱の影響が強く、切断時間は点火薬種により著しく相違するが、電流の増大に従ってジュール熱の効果が主体となり、本実験条件では3A以上になると点火薬種による差異は微小となる。

次に電気雷管の瞬発性はもちろん、通電開始から雷管の爆発までの時間(雷管爆発時間, bursting time)で陰ぜられる、この時間と電橋切断時間との間には induction time<sup>9)</sup>と呼ばれる時間差があり、とくに地震探鉱用電気雷管の場合によく問題になるが、電橋切断が点爆薬の爆発によるときには、添装薬の完爆までの時間をとつても、雷管装薬の平均爆速<sup>18)</sup>から推測して、

Table 6 Bursting time in milliseconds

Ignition charge	$i$					
	0.6 A	0.8 A	1.0 A	1.5 A	2.0 A	3.0 A
Tetracene	14.8	9.0	6.8	5.2	4.1	3.6
DDNP	17.7	8.5	5.8	3.5	2.7	2.3
Mercury fulminate	19.2	8.3	5.3	2.7	2.0	1.4
LMNR	20.9	9.9	7.0	4.9	4.0	3.4
LTNR	22.0	8.0	4.4	1.6	0.9	0.4
Lead azide	45.0	13.0	6.8	2.5	1.3	0.5
Lead thiocyanate/ chlorate	25.5	9.1	5.9	3.5	2.9	2.4

この時間差は無視しうる値となる。要するに、瞬発性は点火時間と点爆時間との和で比較され、点火電流の弱いときは主として点火時間、強いときは主として点爆時間に支配される。

点火電流 $i$ が0.6~3.0Aの範囲における雷管爆発時間はTable 6のようになる。0.8A以下では、テトラセンの如き点火エネルギーまたは点火力積の小さい薬種の雷管爆発時間が短かいが、電流を増強すれば点爆時間の短かいものほど瞬発性の向上率が高い。

#### 4. 点爆及び電橋切断を支配する主因子

##### 4.1 燃焼ガス圧

点爆時間は点火薬から放出されるエネルギーの全量よりもその放出速度に支配され、実験に使用した薬種では主として熱ガスの発生速度によって律せられると考えられる。そこで、点爆時間の検討には、燃焼に伴なう管内ガス圧の上昇過程を把握することが必要である。また点爆以外の電橋切断にも燃焼ガス圧の影響が考えられる。

燃焼圧の測定には種々の方法があるが、ここでは点爆との関連性を調べる目的に有利な方法を取り、点火薬を雷管管体内に近似の条件下で発火させ、仮想点爆薬面の受圧と時間との関係をストレンメーターで測定した。

Fig. 4 (a) の如きステンレス製の密閉筒と同図(b)

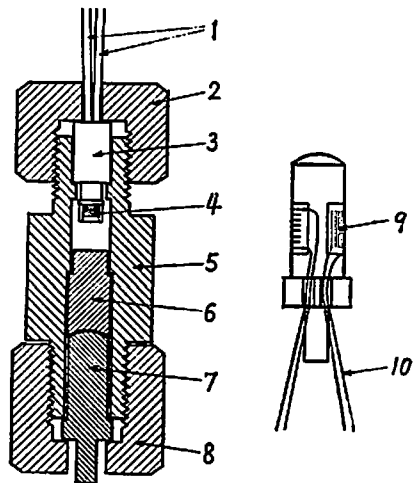


Fig. 4 (a) Closed cylinder, (b) Pick-up.

1. Leading wires
2. Locking nut for sample
3. Bridge plug
4. Ignition charge
5. Stainless steel cylinder
6. Piston
7. Pick up
8. Locking nut for pick up
9. Strain gauge
10. Insulated wires

に示すピックアップを用い、取り出した圧力波形をオシログラフに画かせると同時に、電橋を流れる点火電流波形を重畳記録した。

各点火薬種の記録波形を Fig. 5 に示す。ただし発振器のタイムマークは省略した。なお、NC 5% を用いた、粉状装薬と同薬量のDDNP点火玉試料も調製して比較した。

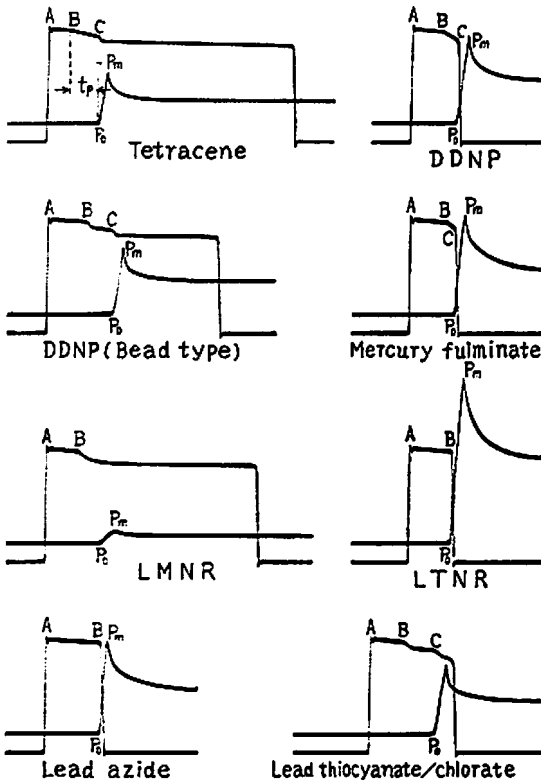


Fig. 5 Sketch of oscillograph traces in combustion pressure measurement.

図において  $P_0$  は加圧開始点、 $P_m$  は最高圧を示す点、 $ABC$  は点火電流波形で、 $B$  が点火薬の発火による折点である。多くの薬種において  $C$  で示した第二の折点または電橋切断点が明瞭に現われるが、これは高温ガスによる急激な昇温と共に、電橋自身が受圧により抵抗線歪計と同様に働くためとみなされ、時間的に  $P_0$  とほぼ一致する。

点火薬の発火から点爆薬面の受圧開始までの時間、即ち  $B$  から  $P_0$  までの時間を  $t_p$ 、同一口の試料を電気雷管に組み立てて測定した点爆時間の平均値を  $\tau$  とし、Table 7 に両者を比較表示すると共に、最高圧  $P_m$  も掲げた。

#### 4.2 点爆薬面の昇温

点火薬の燃焼による管内の温度上昇速度が点爆薬

Table 7

Ignition charge	$i_0$ (A)	$t_p$ (ms)	$\tau$ (ms)	$P_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )
Tetracene	1.0	3.85	4.00	70.2
	3.0	3.60		66.6
DDNP	0.6	1.70		141.9
	1.0	1.82	1.85	134.0
	3.0	1.80		129.5
DDNP (bead type)	0.6	2.50		80.5
	1.0	2.55	2.70	80.2
	3.0	2.53		87.8
Mercury fulminate	1.0	0.97	0.95	145.1
LMNR	1.0	2.83	3.40	7.3
LTNR	1.0	0.00		228.0
Lead azide	1.0	0.00		129.2
Lead thiocyanate/chlorate	1.0	2.97	2.10	92.8

の着火を支配すると共に、電橋の焼断にも影響を及ぼすと考えられる。この場合にも点爆時間との関連性を調べるのが主目的であるから、点爆薬面の初期温度上昇の吟味が必要である。従つて測定可能な温度及び対象とする薬種は限定されるが、管内の仮想点爆薬面の位置に測温部分をおく熱電対法により、昇温開始の時間と点爆時間との関係を求めることを主眼として実験した。細い熱電対は燃焼ガス圧で切れ易いが、感度の高いことが必要のため直径 0.03 mm の白金-白金ロジウム熱電対を使用した。

LMNR は燃焼ガス圧が低いので、Fig. 6 (a) の如き、電気雷管と同様な密閉条件においても上記熱電対の切断が起らず、全昇温過程が記録された。その他の薬種は密閉すると熱電対のガス圧による切断または高温による焼断を起し、テトラセンと DDNP については、実際と多少条件が異なるが、Fig. 6 (b) の如き開管体を用いた場合のみ全温度波形が得られ、さらに雷管は爆燃圧により、ロダゲ薬は高温により、開管体の条件でも熱電対を切るの、測温部が最高温度に達するまでの記録は得られない。しかしそれらについて

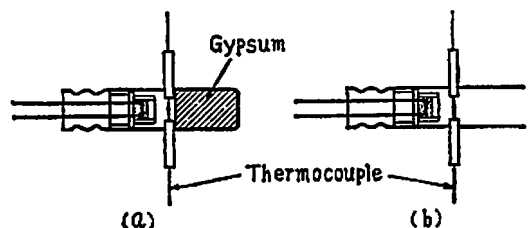


Fig. 6

も測温部の昇温開始点は比較値として求められた。

4.1の場合と同様に、熱電対の示す温度波形と点火電流波形とを同時に記録した。点火薬面と熱電対接点との距離を3mmとして測定したときの波形の一例をFig. 7に示す。

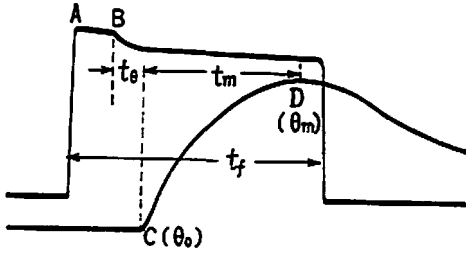


Fig. 7 Sketch of oscillograph traces showing the firing current applied and temperature increase in a closed shell.

(Ignition charge: LMNR)

図において  $C(\theta_0)$  は昇温開始点、 $D(\theta_m)$  は最高温度到達点を表わす。点火薬発火の点  $B$  から昇温開始までの時間  $t_0$ 、これより最高温度到達までの時間  $t_m$ 、電橋焼断時間  $t_f$  及び最高温度  $\theta_m$  の測定値を Table 8 に示す。

Table 8

Ignition charge	Type of shell	$t_0$ (ms)	$t_m$ (ms)	$\theta_m$ (°C)	$t_f$ (ms)
Tetracene	(b)	4.73	49.8	890	86.0
DDNP	"	2.08	19.1	1320	17.2
Mercury fulminate	"	1.20	—	—	7.0
LMNR	(a)	3.48	20.8	850	26.0
	(b)	3.30	52.1	825	56.9
Lead thiocyanate/chlorate	"	2.10	—	>1600	12.6

#### 4.3 考察

アジ化鉛と LTNR は点爆焼断時間は求められないが、ピックアップ作動開始時間の吟味に用い。期待通りに  $B$  と  $P_0$  とが完全に一致する結果を得た。

雷汞及び DDNP (粉状装薬) も密閉下では初期燃焼から爆燃に移るため、燃焼圧による電橋切断が起り、 $t_p$  と電橋切断以外の方法で求めた  $\tau$  とがほぼ一致する。これは燃焼ガス流速が大で、高温ガスが点爆薬面に急速に到達して直ちに点爆薬に着火することを示す。 $t_0$  がやや大きいのは開管体を用いたこと、及び若干の熱電対感温の遅れに帰せられる。DDNP 点火玉は粉状装薬と同薬量であるが、 $t_p$ 、 $\tau$  共に大きく、それに応じてガス圧も低い。これはそれ自身酸素平衡負

の DDNP の結晶が、同様に負の結着剤で強く集結しているためにより不完全燃焼となることと、さらに点火玉を破壊しての熱ガス噴出が遅延することに帰せられよう。粉状装薬と点火玉との燃焼性にはこのような相違がある。

テトラセンの燃焼ガス圧は低く、LMNR ではさらに低い。また両者共、燃焼温度が低い。 $t_p$  と  $t_0$  とが大きく、かつ  $\tau$  は  $t_p$  よりさらに大きいので、点火薬内の燃焼伝播速度とガス流速が小で、点爆薬の着火がかなり遅れることになる。しかし、最高温度到達時間は遙かに長いので、なお点火薬全量の燃焼完了前に着火の起ることが認められる。テトラセンの電流波形にはガス圧の作用による第二の折点が現われるが、電橋切断に対するガス圧の影響は少なく、かつ燃焼温度が低いので切断時間が非常に長い。LMNR の電流波形にはガス圧の影響がほとんど認められない。

ロダン葉では受圧がやや遅れ、むしろ感温の方が早いので、熱粒子投射による点爆薬の着火機構が優勢と考えられる。燃焼ガス圧が最高値に達しても、その圧力のみによる電橋切断は起らないが、電流波形上に第二の折点が強く現われるので、燃焼温度の高いことと相まって切断促進効果はかなり大きい。

なお、測定可能な薬種については、 $t_m$  と  $\theta_m$  を表示したが、LMNR を除いては開管体を用いた値であるから、密閉条件ではガス圧増加に伴う燃焼速度の増大により、最高温度到達時間は遙かに短縮するとみなすべきである。ガス発生量の少ない LMNR においても表示の如き短縮が見られる。また、表より  $\theta_m$  の高低により電橋切断 (焼断) 時間  $t_f$  が左右されることは明らかであるが、密閉下では上記と同様な理由で  $t_f$  もさらに短縮する。

以上の如く、点火薬の発火から、その燃焼ガス圧が点爆薬面に加わるまでの時間、点爆薬面の昇温開始の時間及び点爆時間は全体を通じごく接近した値となり、管体軸方向へ 1mm の点火薬層内の燃焼伝播時間と、点火薬と点爆薬との対面距離 3mm の空間を熱ガス流または熱粒子が進行する時間とで点爆時間の大部分が構成されることが明らかとなつた。

なお上記の対面距離を変化させて点爆薬面の昇温を測定した結果によると、最も遅い LMNR においても平均熱ガス流速は約 10mm/ms となるので、点爆時間は主として点火薬内の燃焼伝播段階によつて支配されることになる。

また点火電流の大小によつて  $t_p$  に明瞭な変化は認められず、点火電流の強さが点爆時間に及ぼす影響の少ないことを再確認した。

点火薬燃焼ガスの圧力と温度及びそれらの上昇速度

が低いと点爆時間は長く、かつ電橋の焼断が点爆切断に先行する点火電流の領域でも、焼断時間が比較的長いので、瞬発性は悪いが直列斉発条件には有利となる。

## 5. 雷管装薬の燃焼期間

### 5.1 管内留雷の燃焼期間の測定

以上の実験結果と考察より、点爆薬の燃焼期間は点爆時間には影響の少ないことがわかったが、実験では主として雷汞が基剤の点爆薬を対象としたので、その先行燃焼の期間が点爆時間に大きな影響はないにしても、雷管の爆力には関係がある。従つて雷汞を雷管管体に圧填したときの燃焼期間とその点火薬種による差異を調べることは、別の面から点火薬の点爆性を検出するために必要と思われる。

木下氏<sup>19)</sup>等は点火条件によつて管内留雷爆粉の爆轟への転移状態が異なることを、鉛板上の爆痕から測定した至完爆長によつて指摘した。この鉛板法は簡便な方法ではあるが、至完爆長からは燃焼期間長短の比較はできても、その時間値は確かめられない。

本実験では、雷管管体内に圧填した雷汞の燃焼期間を流し写真法で測定した。燃焼光と爆轟光の撮影にドラム回転数18,000r.p.m.、フィルム移動速度160m/secの回転カメラを使用した。

5 mm 間隔に小孔をあけた6号電気雷管管体に雷汞を一定圧で装填した後、点火薬の試料を挿入固定し、小孔面を保護ガラス板を介してカメラのレンズに対置させて通電した。管体の第一孔を正確に雷管装薬の先端面層に一致させたので、この部分が着火燃焼すれば、先ずその燃焼光が撮影されることになる。

雷汞の装薬量1.7g(4回に分填)、装填圧50kg/本、装填比重2.8として、各点火薬種により点火したときに得られた雷汞の燃焼並びに爆轟状況の流し写真の代表例を Fig. 8 に示す。

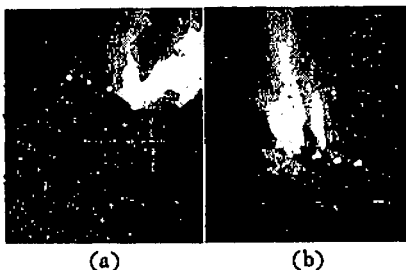


Fig. 8 Streak-camera traces showing the initial burning stage or detonation without burning in pressed mercury fulminate charge.

Ignition charge: (a) DDNP,

(b) Lead azide

管体第一孔の位置に現われた光跡 (Fig. 8 (a) 右下) は燃焼光を示すと考えられるので、光跡長から圧填雷汞の燃焼期間を求めた。その結果を Table 9 に示す。

Table 9

Ignition charge	Pre-detonation period of pressed mercury fulminate charge ( $\mu$ s)
Tetracene	15
DDNP	20
Mercury fulminate	17
LTNR	9
Lead azide	0
Lead thiocyanate/chlorate	23
Lead thiocyanate/chlorate (bead type)	26

### 5.2 考察

アジ化鉛は爆轟に伴う強力な衝撃波によつて雷汞に点爆するので燃焼期間が認められず、第一孔の位置より直ちに起爆している。

LTNR の発火も爆発的であるが、アジ化鉛に比すれば弱いので、圧填雷汞の爆発前に若干の燃焼期間が認められる。

テトラセン、DDNP、雷汞、ロダゲル等による点爆では、さらに長い燃焼期間が存在するが、いずれも30  $\mu$ s以内である。これらの点爆時間はmsの桁であるから、管体内に圧填した雷汞の着火より爆轟転移までの燃焼期間は、点火薬の発火から点爆までの全時間に比して無視し得る程度であることが数値的にも証明された。

なお、小孔の光点像を結ぶ直線の傾斜から管内留雷汞の爆速を求めると、点火薬種による相違はほとんどなく、全体を通じて4300~4500 m/secを得た。このように管体内に多量に装填した雷汞中に一旦爆轟波が形成されれば、その伝播速度は直ちに定常となるのがわかるが、燃焼期間の大小は点爆薬の有効爆発薬量、従つて点爆薬より添装薬への伝播衝撃動量を左右し、雷管全体の爆力に影響を及ぼすことになる。

## 6. 結 言

熱感度が高く比較的に緩性のテトラセンから、熱感度が低く爆性の強いアジ化鉛にわたる広汎に異性質の火薬類を無結着剤の条件で使用して電橋加熱による発火、燃焼性を比較し、粉状点火薬による電気雷管の点爆過程を追究した。

点火薬の燃焼圧と管体内の温度上昇の測定から、熱ガスの発生と点爆時間及び電橋切断時間との関係を吟味し、電橋加熱により易爆発性の薬種を除いては、点



爆時間の大きさは主として点火薬層内の初期燃焼伝播過程によつて定まることを明らかにした。

従つてこれらの粉状点火薬が示す ms の大きさの点爆時間に対しては、点爆過程に含まれる点爆薬の爆轟転移性の関与する段階の影響は少ないことが、上記のことからも推測されるが、さらに同種点火薬の異種点爆薬に対する点爆時間の比較、及び雷管管内に充填した雷汞の燃焼期間の実測によつて確認した。

本研究について終始御鞭撻を賜つた山本祐徳教授に厚く御礼申し上げると共に、実験に協力された柳沢剛氏、関本尚雄氏に深甚の謝意を表する。

#### 文 献

- 1) E. Jones: Proc. Roy. Soc. A 198, 53 (1949)
- 2) H. P. Stout and E. Jones: "3rd. Symposium on Combustion" p. 329 (1949)
- 3) 木下四郎, 中原正二: 工火協誌 17, 202 (1951); 18, 135 (1957)
- 4) 岡崎一正, 柳沢剛: 工火協誌 17, 202 (1956)
- 5) H. Kauffmann and E. de Pay: Ber. 37, 725 (1904)
- 6) A. Stettbacher: Nitrocellulose 8, 3 (1937)
- 7) R. A. Zingaro: J. Am. Chem. Soc. 76, 816 (1954)
- 8) E. Jones and H. P. Stout: Colliery Eng. 25,

Nov. (1948)

- 9) J. Taylor and P. F. Gay: "British Coal Mining Exposives," George Newnes Ltd., London, p. 62 (1958)
- 10) 岡崎一正: 工火協誌 10, 169 (1950)
- 11) D. Altman and A. F. Grant: "4th Symposium on Combustion" p. 158 (1953)
- 12) B. Lewis and G. von Elbe: "Combustion, Flames and Explosions of Gases" Academic Press, New York, p. 429 (1951)
- 13) Princeton Univ. Statistical Research Group: PB 23709
- 14) 安井義之, 松川太郎: 化学の領域増刊 36号, 1 (1959)
- 15) W. J. Dixon and A. M. Mood: J. A. S. A. 33, 109 (1948)
- 16) 木下四郎: 工火協誌 15, 7 (1954)
- 17) 伊藤一郎, 若園吉一, 藤中雄三: 工火協誌 21, 297 (1960)
- 18) 井田一夫: 工火協誌 21, 286 (1960)
- 19) 木下四郎: 工火協誌 12, 7 (1951)
- 20) 木下四郎, 福山仁, 桐村美義: 工火協誌 16, 80 (1955); 18, 237 (1957)

## Priming Characteristics of Ignition Charges

Kazumasa Okazaki

For the purpose of analysing the priming process in electric detonator more precisely, work was carried out with ignition charges containing no binder. Ignition materials used in the experiments were tetracene, diazodinitrophenol (DDNP), mercury fulminate, lead mononitroresorcinate (LMNR) and lead thiocyanate/potassium chlorate (50:50) composition. Lead trinitroresorcinate and lead azide were also used in order to confirm the experimental results.

In tetracene and LMNR, the reaction time is fairly long, owing to their comparatively slow burning properties and low combustion temperatures. DDNP and thiocyanate/chlorate composition give moderate reaction time.

Therefore, in the above-mentioned ignition system, they should be suitable for use in series shotfiring.

As a whole, both the reaction time and the lag time become longer with decrease in the rates of combustion pressure rise and temperature rise in a detonator shell.

From the comparison of each reaction time for various priming charges and the measurement of pre-detonation periods of pressed mercury fulminate charge, it is confirmed that the transient process from burning to detonation in priming charge has little influence upon the reaction time of the order of milliseconds.

(Faculty of Engg., Univ. of Tokyo)