

工業爆薬の固有爆速と反応時間

(昭和28年1月9日受理)

山家 信次・福田 寛雄

(日本カーリット株式会社)

I 緒言

爆薬の爆速は薬包の直径及爆薬の外装容器の抵抗によつて変化する事は従来から知られて居り、これらの影響に関しては、爆発反応が爆轟波面に於いて完全に終了する事なくある時間を要する為爆発ガスが軸方向とある角度を以て流出する為であるとする Jones の Nozzle theory¹⁾ 及同一作用によつて爆轟波面が球面となると云う Eyring 等の Curved front theory²⁾ が発表されて居る。又 Copp 及 Ubbelohde³⁾ は Jones の理論から、アマトール爆薬に関して反応帯の長さから、反応時間を見出して居る。以上何れも実験例証を掲げて居るが、使用爆薬は何れも軍用の芳香族ニトロ化合物を主としたもので、工業爆薬に関しては計算されて居ない様である。

一方ダイナマイト系工業爆薬の爆速は、薬径、薬包の抵抗によつて変化する外、起爆点よりの距離によつて変わり、定常爆速を確認することが困難なことは既に多数の実験によつて証明されて居る。従つてダイナマイト関係の固有爆速をこの方法で見出すことは仲々困難であるので、ここでは硝安系爆薬及カーリット系混合爆薬について研究することとした。

II 爆速の修正理論

正常の一次元爆轟に於いて(図1参照)未反応爆薬が爆速 D で右より左に動いて居るとすれば、この爆薬が爆轟帯に入る。先ず平面の衝撃帯に入りここに急激な圧力及温度の上昇をきたす。そしてこの衝撃帯を過ぎると物質速度 (mass velocity) が D の 50~80% に減少する。この衝撃帯の厚さは 10^{-5} cm 位で極めて薄

い層であるに拘らず、圧力及温度の異状の高さの為分子の熱運動が極度に激しくなるために、これら相互の化学反応が急速で進行する。この反応帯は普通爆薬では 0.1~2.0cm 位であつて同時に温度の上昇を併う。

この反応帯の終りには、爆発生成物は一応その温度に於ける平衡状態となり、圧力、化学成分、温度、流速等が決定される。かくして反応生成物がその固有爆速 D_i で流出する。

図1に於いて爆薬の爆発生成物は A を nozzle とした流出と同じことになるが、被包の変化により爆発ガスの円周方向への膨脹によりその圧力が減少する為爆速 D が影響される。

今図1に於いて円錐の半径を R 、爆速を D 、爆発反応帯の長さを a 、爆発反応時間を t とすれば

$$a = Dt$$

である。又 D_i を被包に影響されない固有爆速とする時は上記二つの理論につき外装被包の状況により次の式が導かれて来る。

1. Jones の Nozzle theory¹⁾

i) 薄被包の場合

$$\left(\frac{D_i}{D}\right)^2 = 1 + \frac{9}{8} \cdot \frac{a^2 d}{RS} \quad \dots\dots(1)$$

但し d : 爆薬の密度 S : 爆薬の単位表面積に対する被包の質量

ii) 厚被包の場合

$$\left(\frac{D_i}{D}\right)^2 = 1 + 9 \frac{a \tan \beta}{R} \quad \dots\dots(2)$$

但し β : 被包の変形角, Jones によれば $\beta = 1^\circ - 18'$ (鉄), $3^\circ - 48'$ (ガラス), $10^\circ - 40'$ (ベークライト) である。

2. Curved-front theory

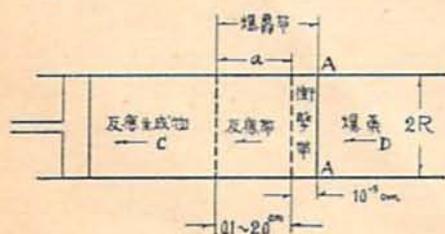
この理論によれば Eyring²⁾ 氏等は積分後略近式として次の様な式を導いて居る。⁴⁾

i) 無包装の場合

$$\frac{D}{D_i} = 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{a}{R} \quad \dots\dots(3)$$

ii) 薄被包の場合

図1



$$\frac{D}{D_i} = 1 - 2.17 \frac{(a/R)^2}{W_c/W_e} \quad \dots\dots (4)$$

但し W_c : -被包の質量 W_e : -煤葉の質量

iii) 厚被包の場合

$$\frac{D}{D_i} = 1 - 0.88 \frac{a}{R} \sin \phi \quad \dots\dots (5)$$

但し ϕ : -爆轟波面への法線と軸とのなす角

今これらの式に於いて粉状煤葉の場合を考え、実験値を入れて計算を進めることにした。

III 実験例及計算

1. カーリットに関する実験成績

ここに示す実験例の中で、黒カーリット及1号硝煙は共に昭和11年4~11月の成績で、日本カーリット保土ヶ谷工場に於いて故加納元市氏の測定された測定値であり、特種カーリットに関するものは筆者が昭和27年3月に行つたものである。その成分は黒カーリット [NH_4ClO_4 75, 珪素鉄 (Si92%) 16, 木粉 6, 重油 3], 特種カーリット [NH_4ClO_4 49, NaNO_3 35, DNN 10, 木粉 4, 重油 2], 1号硝煙 [NH_4NO_3 76, DNN 8, 澱粉 2, 食塩 14] で1号硝煙は昭和10年11月、日化製のものを使用した測定値である。測定爆速は主として1個につき3回の平均値であつて表1に示す通りである。

2. ダイナマイトに関する実験成績

表 1

葉種	被筒種	内径 (2R) (m/m)	爆速 (D) (m/sec)	$1/D^2 \times 10^{12}$ (sec ² /cm ²)	$D/R \times 10^{-5}$	$D^2/R \times 10^{-10}$ (cm/sec ²)
黒カーリット	紙筒	20	3078	10.56	3.078	9.474
	△	30	3360	8.86	2.218	7.526
	△	35	3437	8.47	1.963	6.745
	△	40	3513	8.11	1.756	6.171
	△	50	3647	7.52	1.459	5.320
	△	80	4114	5.91	1.064	4.231
	△	100	4100	5.95	0.820	3.362
	△	130	4171	5.76	0.642	2.680
	引抜鋼管	18	3371	8.80	3.742	12.614
	△	25	3586	7.78	2.869	10.288
黒カーリット	△	35	3800	6.93	2.170	8.246
	△	38	3932	6.47	2.068	8.131
	△	51	4058	6.07	1.591	6.456
	△	75	4191	5.69	1.119	4.690
	△	100	4434	5.09	0.887	3.933
	△	126	4244	5.55	0.675	2.856

一号硝煙	紙筒	20	2865	12.18	2.860	8.208
	△	30	3104	10.38	2.063	6.424
	△	35	3222	9.64	1.840	5.938
	△	40	3374	8.79	1.687	5.692
特種カーリット	△	18	2900	11.89	3.225	9.352
	△	20	2970	11.34	2.970	8.821
	△	25	3180	9.89	2.544	8.090
	△	30	3290	9.24	2.194	7.220
	△	35	3470	8.31	1.981	6.875
	△	50	3580	7.80	1.432	5.127

表 2

葉種	被筒種	内径 (2R) (m/m)	爆速 (D) (m/sec)	$1/D^2 \times 10^{12}$ (sec ² /cm ²)	$D/R \times 10^{-5}$
新桐ダイナマイト	ブリキ筒	10	1775	31.74	3.55
	△	15	2425	17.01	3.24
	△	20	2350	18.11	2.35
	△	25	5100	3.85	4.09
	△	30	5000	4.00	3.33
	白梅ダイナマイト	△	10	2050	23.79
△		15	2150	21.63	2.86
△		20	2500	16.00	2.50
△		25	2500	16.00	2.00
△		30	4350	43.50	2.80
桜ダイナマイト		ブリキ筒	10	—	—
	△	15	1700	34.60	2.27
	△	20	1800	30.87	1.80
	△	25	2300	18.91	1.84
	△	30	2400	17.36	1.60
	硝安ダイナマイト	△	10	1425	49.25
△		15	1575	40.31	2.10
△		20	1925	26.99	1.93
△		25	1900	27.70	1.52
△		30	2200	20.66	1.47
三号硝安煤葉		△	10	2650	14.24
	△	15	2800	12.75	3.70
	△	20	3250	9.47	3.25
	△	25	3300	9.18	2.64
	△	30	3500	8.16	2.34
	桂ダイナマイト	△	10	1150	75.62
△		15*	2050	23.79	2.73
△		20	2500	16.00	2.50
△		25	3050	10.75	2.44
△		30	2600	11.89	1.93

表2は昭和26年10月旭化成ダイナマイト部の実験成績*であつて、ブリキ管入り爆薬の爆速をドートリッシュ法で測定したものであるが、薬径が10m/mから30m/m迄である為安定爆速に達して居ない様である。然しこれも一応参考の爲に計算した。

この他に鈴木氏の実験⁷⁾による 径30m/mの被筒の厚さを異にする場合のダイナマイト及カーリットの実験成績及山本教授⁸⁾の板ダイナマイト及黒、紫カーリットの実験成績があるが、これらは何れも起爆点よりの距離による爆速の変化の測定値であつて、薬径の変化による測定は山本教授の60%板ダイナマイトに関し、20, 25, 35m/mの薬径について厚さ4m/mの鋼管を使用して測定されたデータの他に適當なものが見当らない。

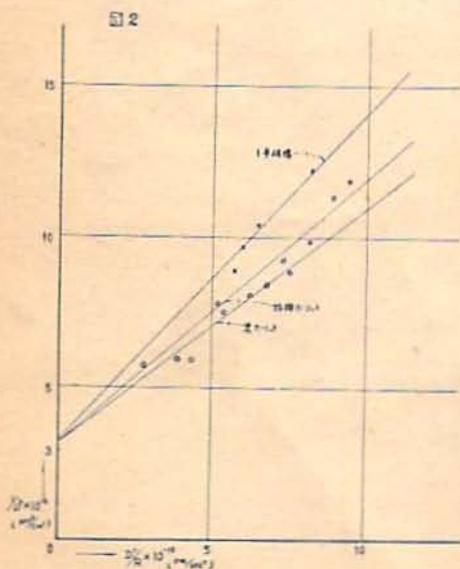
3. カーリットに関する計算

i) Jones の Nozzle theory の場合

表1の成績と Jones の式とを検討して見るのであるが、先づ(1)式を変形して

$$\frac{1}{L^2} = \frac{1}{D_i^2} + \frac{9}{8} \cdot \frac{t^2 d}{S} \cdot \frac{1}{D_i^2} \left(\frac{D_i^2}{R} \right) \dots (1)'$$

とし表1の成績を、 $\frac{1}{D_i^2}$ 及 $\frac{D_i^2}{R}$ を座標軸とするグラフ上にプロットすれば直線が得られる筈であるが、この様にして描いたものが図2である。測定値に相當のパックがあるが何れも大体直線となるのでこれから各薬種の方程式を求めれば次の如くなる。



* 同社の好意による。

黒カーリット(紙筒)

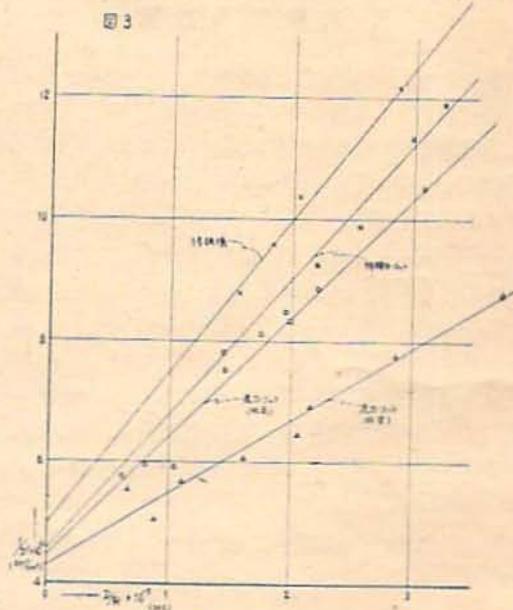
$$\frac{1}{D_i^2} = 3.20 \times 10^{-12} \left[1 + 0.244 \times 10^{-10} \frac{D_i^2}{R} \right] \dots (6)$$

1号硝薬(紙筒)

$$\frac{1}{D_i^2} = 3.30 \times 10^{-12} \left[1 + 0.330 \times 10^{-10} \frac{D_i^2}{R} \right] \dots (7)$$

特種カーリット(紙筒)

$$\frac{1}{D_i^2} = 3.25 \times 10^{-12} \left[1 + 0.266 \times 10^{-10} \frac{D_i^2}{R} \right] \dots (8)$$



(1)' と (6) より

$$\frac{1}{D_i^2} = 3.2 \times 10^{-12} \dots (9)$$

$$\frac{9}{8} \cdot \frac{t^2 d}{S} = 0.244 \times 10^{-10} \dots (10)$$

これに紙筒の厚さを、1.5m/m、比重を 0.8 として計算すれば

$$\left. \begin{aligned} D_i &= 5590 \text{ m/sec} \\ \bar{t} &= 1.56 \times 10^{-6} \text{ sec} \\ a &= 0.87 \text{ cm} \end{aligned} \right\} \dots (11)$$

同様に(7), (8)式より夫々 D_i , \bar{t} , a の求めたものが表3であるが、Copp 及 Ubbelohde によるアマールの実験に比し稍小さい様である。

表 3

薬種	黒カーリット	1号硝薬	特種カーリット
外装	紙筒	紙筒	紙筒
D_i (m/sec)	5590	5500	5550
\bar{t} (microsec)	1.56	1.88	1.57
a (cm)	0.87	1.04	0.87

次に同じく Jones の厚被包の式 (2) を変形して

$$\frac{1}{D^2} = \frac{1}{D_0^2} + \frac{B}{D_0^2} \left(\frac{D}{R} \right) \quad \dots\dots(2)'$$

但し $B = 9\bar{t} \tan \beta$

これに表1の値を夫々 $\frac{1}{D_0^2}$, $\frac{D}{R}$ を座標軸としてプロットして得たものが図3であるが、これらも殆ど直線となるので図3より直線の式を求めれば

黒カーリット(紙筒)

$$\frac{1}{D^2} = 4.45 \times 10^{-12} \left[1 + 0.489 \times 10^{-5} \frac{D}{R} \right] \quad \dots\dots(12)$$

黒カーリット(鋼管)

$$\frac{1}{D^2} = 4.30 \times 10^{-12} \left[1 + 0.277 \times 10^{-5} \frac{D}{R} \right] \quad \dots\dots(13)$$

1号硝煙(紙筒)

$$\frac{1}{D^2} = 4.96 \times 10^{-12} \left[1 + 0.506 \times 10^{-5} \frac{D}{R} \right] \quad \dots\dots(14)$$

特種カーリット(紙筒)

$$\frac{1}{D^2} = 4.55 \times 10^{-12} \left[1 + 0.492 \times 10^{-5} \frac{D}{R} \right] \quad \dots\dots(15)$$

薄被筒の時と同様にして(2)'と(2)式より

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{D_0^2} &= 4.45 \times 10^{-12} \\ 9 \tan \beta \bar{t} &= 0.489 \times 10^{-5} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(16)$$

紙筒に於ける $\beta = 18^\circ$ として計算すれば、黒カーリットの固有爆速及反応時間は、夫々 4720m/sec, 1.67 microsec となるが、(13)(14)(15)式より計算した値を表4に示す。

表 4

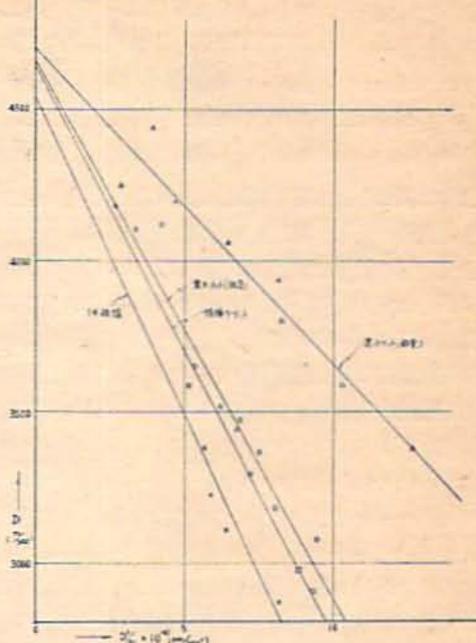
薬種	黒カーリット		1号硝煙	特種カーリット
	紙筒	鋼管	紙筒	紙筒
D_0 (m/sec)	4720	4820	4490	4690
t (microsec)	1.67	1.58	1.73	1.68
a (cm)	0.79	0.76	0.78	0.79

ii) Eyring の Curved-front theory の場合
無包装及厚被包の場合を除外し薄被包の時のみを考える事として(4)式を変形して

$$D = D_0 \left[1 - 1.085 \frac{a d}{S} \left(\frac{D^2}{R} \right) \right] \quad \dots\dots(4)'$$

とすれば、前同様に表1の成績を D 及 $\frac{D^2}{R}$ を座標軸としてグラフ上にプロットしたものが図4である。これらはあまりよい直線上の点にはならないがこれより一定直線方程式を求めれば

図 4



黒カーリット(紙筒)

$$D = 4.660 \times 10^3 \left[1 - 3.83 \times 10^{-12} \frac{D^2}{R} \right] \quad \dots\dots(17)$$

黒カーリット(鋼管)

$$D = 4.700 \times 10^3 \left[1 - 2.22 \times 10^{-12} \frac{D^2}{R} \right] \quad \dots\dots(18)$$

1号硝煙(紙筒)

$$D = 4.540 \times 10^3 \left[1 - 4.65 \times 10^{-12} \frac{D^2}{R} \right] \quad \dots\dots(19)$$

特種カーリット(紙筒)

$$D = 4.640 \times 10^3 \left[1 - 4.07 \times 10^{-12} \frac{D^2}{R} \right] \quad \dots\dots(20)$$

(4)'と(17)より

$$\left. \begin{aligned} D_0 &= 4.660 \times 10^3 \\ 1.085 \frac{a d}{S} &= 3.83 \times 10^{-12} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(21)$$

これを計算して

$$\begin{aligned} D_0 &= 4660 \text{ m/sec} \\ t &= 0.63 \text{ microsec} \\ a &= 0.29 \end{aligned}$$

となるが同様にして(18), (19), (20)より計算したものは表5の通りである。

表 5

薬種	黒カーリット		一号 硝爆 紙筒	特博カー リット 紙筒
外装	紙筒	鋼管		
D_0 (m/sec)	4660	4700	4540	4640
\bar{t} (microsec)	0.63	1.23	0.72	0.63
a (cm)	0.29	0.58	0.33	0.29

鋼管に於ける方が反応時間が遅いのは薄被包の式に鋼管を適用する事が無理であると思われる。

上記計算の結果によれば、Jones の Nozzle theory の式からは反応時間 \bar{t} は 1.5~1.9 microsec, 反応帯の長さ a は 0.8~1.0cm 附近の値を得るが薄被包の場合は固有爆速 D_0 が稍高過ぎる様であり、厚被包の式の方が適合する様に思われる。Eyring の式による時は反応時間が少し速過ぎる様である。

4. ダイナマイトに関する計算

ダイナマイト系爆薬に於いては既に引用した文献で見ると、起爆点からの距離により爆速が漸増して居る固有の爆速を見出す事が困難であり、殊に薬径の小なる時は定常爆速に達しない為噴速を jet theory 等によつて求める事が出来ない。然し鈴木氏による肉厚 135m/m の鋼管の終速 7353m/sec 附近と考えられる。

次に表2の結果を Jones の nozzle theory に代入すると三号硝爆の外ダイナマイト系は何れも薬径の細い為安定爆速に達せず式(1)との適合が満足でないが、他の理論式では尙更不適合である。新桐の如きは薬径が 30m/m の場合は一定定常に近い爆速になるがそれより細い薬包では不定常爆速となり、白梅も新桐と同様であるが、25m/m 以下の薬包では固有爆速 4560m/sec となり、反応時間は硝爆の二倍となつて居る。又桜、桂及び硝安ダイナマイトは何れも定常爆速を示して居ないが、これらの実験値を Jones の厚被包の式に適用して求めた値を図5、表6に示す。

表 6

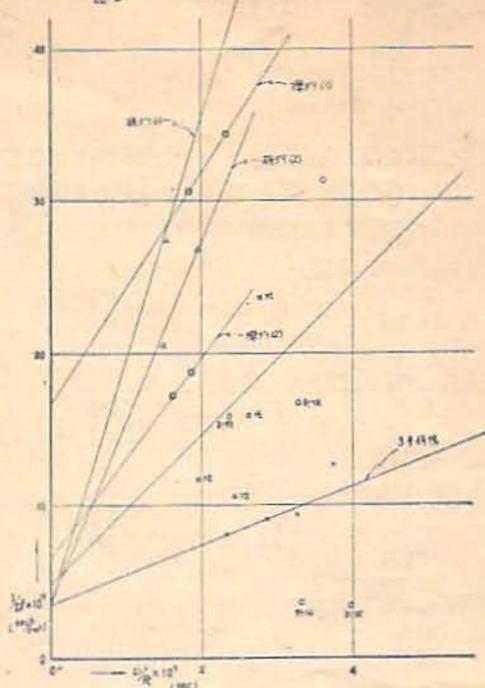
薬種	三号 硝爆	白梅 ダイ	硝ダ イ (1)	硝ダ イ (2)	桜ダ イ (1)	桜ダ イ (2)
D_0 (m/sec)	5200	4560	5200	5200	2450	3890
\bar{t} (microsec)	3.34	6.05	27.6	20.4	29.9	64.2

IV 結 論

以上の事実から次の結論が得られる。

1. カーリット及硝爆系爆薬は、薬包の被包及薬径によつて爆速を異にするが、一定定常爆速を示し、これらの爆薬の爆速は Nozzle theory 或は Curved front

図 5



theory を満足するが Nozzle theory の方が計算によく適合する。

2. Jones の Nozzle theory から求めた固有爆速、反応時間、並に反応帯の長さは表3に示す如くである。

3. ダイナマイト系爆薬は実験に用いた被包の如き薄被包、又は薬径の細いものでは定常爆速が得られない。桜ダイナマイトの如きは、2000m/sec 内外の爆速で爆発する時の反応帯の長さは数値に達する如く考えられる。

文 献

- 1) Jones. Proc. Roy. Soc. London A 189, 415 (1947) Chem. Rev. 45, 99 (1949)
- 2) Eyring: Chem. Rev. 45, 107 (1949)
- 3) Copp & Ubbelohde: Trans Faraday Soc. XLIV 646, 658 (1948)
- 4) 例えば鈴木富治: 火薬 2, 211 (昭 16 年)
山本祐徳: 火薬 3, 285 (昭 17 年)
- 5) Jones, Copp, and Ubbelohde: Trans. Faraday Soc. XLIV, 648 (1948)
- 6) Eyring: Chem. Rev. 45, 112~116 (1949)
- 7) 鈴木富治: 火薬 2, 211 (昭 16 年)
- 8) 山本祐徳: 火薬 3, 285 (昭 17 年)

**On the Ideal Detonation Velocity and
Time of Reaction of Some Industrial Explosives
By Nobuji Yamaga and Hirowo Fukuda**

The detonation velocity of the ideal plane wave and the time of reaction of some industrial explosive have been calculated by applying the experimental data to the Jones' nozzle theory and the Eyring's curved front theory at the explosion front.

The results calculated are as follows:

Equation	by Jones' equation			by Eyring's equation		
	Carlit Kuro-brand	Ammonium explosive Type I	Carlit Tokukaba- brand	Carlit Kurobrand	Ammonium explosive Type I	Carlit Tokukabe brand
Detonation Velocity (Ideal) (m/sec)	5155	4995	5095	4660	4540	4640
Time of Reaction (sec)	1.62×10^{-6}	1.81×10^{-6}	1.63×10^{-6}	0.63×10^{-6}	0.72×10^{-6}	0.63×10^{-6}
Length of the Reaction zone (cm)	0.83	1.41	0.83	0.29	0.33	0.29

In cartridges of small diameter, gelatinous dynamites show no stationary detonation, and the ideal velocity of detonation and the length of the reaction zone could not be calculated.

(The Nihon Carlit Co., Ltd.)

高速度活動写真機による爆焰の研究

(昭和 27 年 12 月 20 日受理)

第 1 報 各種爆薬の臼砲による爆焰の研究

大 川 禎 三

(旭化成延岡工場)

1. ま え が き

高速度活動写真機を用いて、臼砲による各種爆薬の爆焰の発生状況を撮影した。ここでは、得られた写真のみを掲載し、爆焰の噴出速度、燃焼速度等の数値は次報に譲る。

2. 高速度活動写真機

使用した高速度活動写真機は福原式 16 ミリ撮影機であり、その概要は次の通りである。

(1) 形状寸法並に性能

写真 1 に示すようなもので、高さ 31 cm、横 28 cm、巾 19 cm、重量 27 kg の小型のものである。撮影速

度は最高 1 万 1 千 1 百 1 十 1 秒である。内部にストロボ式タイムマーカーが設置され、フィルムに速度が記録されるようになっている。又、撮影機の上面に速度指示計があり、之によつて外部より、フィルム速度を知ることが出来る。

(2) 構造

内部構造は第 1 図に略示した通りであり、八角形のプリズムがシャッターの役割を演じている。フィルム

(3) 作 動

撮影機の裏面(写真 2)には、フィルムを好動さすクランチがある。運転は手動式又は電動機による両方の軸がある。普通は手動によつてゐる。歯車の数段の増速により容易に 6000 回転度に達する。実際使用する

は高速回転するスプロケットにより、下方の暗箱中へ急速に移行される。

場合は写真3の如く、鉄骨上に取り付け、振動することのなきよう設置し、電気的リレー等を用いて、フィルムの始動と、撮影すべき現象とを同調させて撮影する。

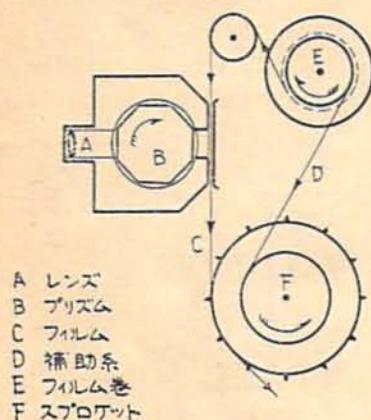
3. 実験方法

弾道振子用の白砲 (外径55 cm, 長さ75 cm, 腔の直径5.5 cm, 深さ5.5 cm) を使用し、込物なしで6号雷管を使用し、正位置にて、A.C.100Vで起爆した。

撮影は第2図に示す如き要領にて、白砲より10mの距離に高速度活動写真機及び望遠レンズを附したラ

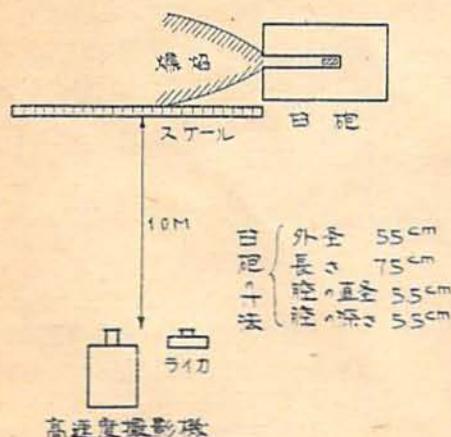
図1

高速度撮影機内部構造



- A レンズ
- B プリズム
- C フィルム
- D 補助系
- E フィルム巻
- F スプロケット

図2 爆焰撮影要領図



イカカメラを置き、夜間実験を行った。

高速度撮影に使用したフィルムは、16ミリさくらUS反転フィルムであり、撮影速度は4500~5500 1/秒であつた。

4. 試料

用いた爆薬の種類及び重量は次の9種である。

- (1) TNT(50g, 起爆を確実ならしめるため、6号雷管の周囲に予捏薬5gをつけた), (2) 黒色小粒薬(50g), (3) 予捏薬(N/G+5% C/C, 100g), (4) 桜ダイナマイト(100g), (5) 新桐ダイナマイト(100g), (6) 白梅ダイナマイト(100g), (7) 硝安ダイナマイト(100g), (8) 硝安爆薬(100g), (9) LD硝安ダイナマイト(100g)。

5. 実験結果並に考察

望遠レンズを附したライカカメラによる静止写真を撮影4に示した。写真中のスケールは1目盛が10cmである。高速度撮影にて得られた結果はNo.1~10に互つて示した。

TNTは分解ガスが白砲外にて、空気と第2次燃焼を行つているのが明瞭に認められる。これはTNTは酸素バランスが①(-0.740g/g)であるからである。

産業用爆薬は通常、酸素バランスは④になるよう配合されているので TNT の如き明瞭な第2次燃焼を示さないが、新桐ダイナマイトの爆焰写真をみると、第1輪~第4輪と第5輪以後との爆焰の性質が異なつたものであることが写真より明瞭であり、第5輪以後は爆発分解ガスが白砲外で燃焼したものである。このように成分の配合の上では酸素バランスは④であるが白砲外での第2次的燃焼がみられる。

なお、これらの実験結果よりの考察の詳細は次報に譲る。

6. 電磁オシログラフによる測定との比較

光電管を用いて電磁オシログラフにより、爆焰の持続時間、光度等の測定をも併せて行つているが、当工場の石本氏(2)の得た結果の一部を第3,4,5図に示した。図のA,Bの時間を測定すると第1表の通りである。

爆焰部分	A	B
TNT	2.1ms	50ms
桜ダイナマイト	0.6	14.3
新桐ダイナマイト	0.8	0.2

(註) 薬量は100g, 15mの距離で測定す。