

雷管の基礎的研究

(第七報 工業雷管内の爆速)

(昭和26年5月23日受理)

又 木 武 一

(帝國火工品川越工場)

I 緒 言

前報に於て、火薬爆発時に於ける最大並最小爆速から反応帯長を計算し、爆速の発展経過を表す式を得たので、之を工業雷管内に於ける爆粉及び添装薬の爆発過程に適用して見た。工業雷管では、先づ爆粉の燃焼から爆発に移り、次で添装薬を爆発させるものと考えれば、雷管内の爆発は次の四段階に分けられる。第1段は10m/s位の燃焼から爆発に移る過程で、臨界爆粉量を支配するものは此の段階である。第2段は爆粉が爆発に移つて次第に爆速が増加し、添装薬に到達する迄の期間で爆速の急激な増加が見られる。第3段は爆粉から添装薬に爆発が移る過程で、此の反応が不充分の場合には、所謂雷管の半爆現象を起す。第4段は、添装薬内を爆発が進行して行く過程で、爆粉よりは遅い加速度であるが爆発距離が増加するに従つて爆速は増加して行く。以下第2~4段の経過を、前報で得た反応帯長を使用して推定し、次報に報告する改良雷管の基礎を作つた。

II 添装薬の中断現象

添装薬の最初の爆速が臨界速度 D_0 より大きい場合、即ち図1で示される D_0 の場合には爆速は次第に増加して最後には安定爆速 D_s に達する。然るに D_0 より小さい D_0' では、爆速は次第に低下して中断するに至る。即ち D_0 は工業雷管が半爆するか完爆するかを臨界爆速、即ち最小爆速を表す臨界爆速は前報の(8)式に従い、

$$D_0 = D_i \left(\frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{a_i k_2}{R}} \right) \quad \text{.....(1)}$$

工業雷管の場合、管体は鋼製で且厚味は0.2耗と極め

て弱いので $k_2=0.45$, $R=3$ 耗とすれば、テトリルの反応帯長は第六報に従い、1耗であるから、之等の値を(1)式に代入すると $D_0=0.184D_i$ となる。

理想爆速 D_i は、第五報で計算した様に装填比重1.2の場合6,440m/s, 1.6の場合8,240m/sであるから、上式に従つて D_0 を計算すると、夫々1,190m/s及1,520m/sとなる。即ち臨界爆速が増加するので起爆し難くなる。同様にしてトロチルの場合は $\Delta=1.2$ の場合 $D_0=2,460$ m/sとなる。即ちテトリルより臨界爆速が大きいので、起爆し難い事となる。従つて臨界爆速に達する爆粉量即ち臨界爆粉量も増加する。実際に発火率から臨界爆粉量を求めると、トロチルでは0.26gとなつてテトリルの0.15gに比して著しく大きくなつて居る。之は結局臨界爆速の差によるものと思われる。

今添装薬 ($\Delta=1.2$ のテトリル) が臨界爆速に達した場合の瓦斯圧力 P 及瓦斯の流れの速度 W は爆発して居るテトリルの中に於ては P_0 , W_0 は小さいから省略すると、第五報の(12)及(15)から、

$$PV_0 = WD \quad \text{.....(2)}$$

$$\frac{W}{D} = \frac{1-\alpha/V_0}{1+\gamma} \quad \text{.....(3)}$$

上式に D , V_0 , α , γ の値を代入すれば此の状態に於けるテトリル中の W 及び P の値が求められる。

次にテトリルが1,190m/sの爆速を得る為に必要な雷管の爆速を計算して見る。爆粉が反応して生ずる稀薄波 (rarefaction wave) を Eyring 氏の式に従つて計算して見る。稀薄波中では爆発安定の条件が成立するから連続方程式に従つて

$$\frac{\alpha W}{D-W} = -\frac{\alpha V}{V} \quad \text{.....(4)}$$

音速 U は $U=D-W$ であるので第五報の(13)式から

$$U = \sqrt{\frac{\gamma P}{V-\alpha}} \quad \text{.....(5)}$$

$$U_0 = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{V_0-\alpha}} \quad \text{.....(6)}$$

Abel の状態式を使用し、断熱膨脹が行われるとすれば

$$P(V-\alpha)^\tau = P_0(V_0-\alpha)^\tau \quad \text{.....(7)}$$

故に(4)から

$$W - W_0 = \int_{V_0}^{V_0} \frac{V}{V} dV = \frac{2U_0}{\gamma-1} \times \frac{V_0 - \alpha}{V_0} \times \left[1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \dots\dots\dots (8)$$

之が稀薄波の式である。之に各値を入れてテトリルが最小爆速を生ずるに必要な雷管爆発中に於ける W と P を求め、逆に(2)と(3)から雷管の爆速を計算すると

$$D = 900 \text{ m/s} \dots\dots\dots (9)$$

を得る。即ち雷管の爆速が 900 m/s 以上になれば、工業雷管中のテトリルは中断せずに進行するから、之以下では爆発が中断して所謂雷管の半爆を起す。要するに臨界爆粉量とは、爆粉が燃焼から爆発に移つて、その爆速が約 900 m/s になるに必要な薬量と解される。

III 爆粉内の爆速

雷管を使用した場合、臨界爆速に於ける爆速比は $y = D_0 D_c = 900/4,060 = 0.224 \dots\dots\dots (10)$

である。工業雷管に於て爆粉の代りに雷管のみを使用した場合には、実験の結果、臨界爆粉量は 0.20 g である。然るに雷管と硝酸酸カリを混合した爆粉では爆発熱量が増加するから、同一装填比重でも理想爆速は増加し 4,510 m/s となり、同一爆速比では

$$4,510 \times 0.224 = 1,070 \text{ m/s} \dots\dots\dots (11)$$

となる。一方テトリルを爆発させるには 900 m/s でよいから爆粉が 900 m/s になるには 0.2 g 以下で良い訳である。実際に爆粉で発火率から臨界爆粉量を求めて見ると、0.15 g となつて雷管のみより小さい。実際には工業雷管では爆粉を 0.4 g 使用し、その薬長は 7 耗であるから、0.15 g では薬長 2.6 耗に当る。即ち爆粉がテトリルを爆発させるに必要な爆速 900 m/s に達するのは、爆粉面から 2.6 耗の位置で、此の点 c に於ける爆速比は

$$900/4,510 = 0.2 \dots\dots\dots (12)$$

となるので今 c 点を原点と考えると $y_0 = 0.2$ である。工業雷管の爆粉中に於ける爆速の変化を調査する為、前報の(11)式に於て

$$\log \frac{\sqrt{A} - 0.5 + y}{\sqrt{A} + 0.5 - y} - \log \frac{\sqrt{A} - 0.5 + y_0}{\sqrt{A} + 0.5 - y_0} = \frac{k_1}{a_1} \times 2\sqrt{A} x \dots\dots\dots (13)$$

$$\text{但し } A = \frac{1}{4} - \frac{a_1 k_2}{R} \dots\dots\dots (14)$$

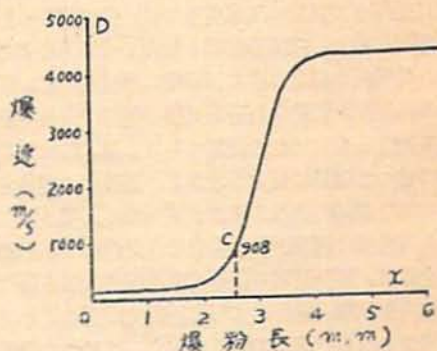
工業雷管に於て $R=3$, $k_2=0.45$, 爆粉では $a_1=0.2$ 耗 $k_1=0.333$ とすれば $\sqrt{A}=0.469$ であるから y と x の関係は

$$\log \frac{y-0.031}{0.969-y} + 0.66 = 1.56 x \dots\dots\dots (15)$$

此の式に x の値を代入すると y の値が求められ、更に $D_c=4,510 \text{ m/s}$ であるから之から各点の爆速が求められる。下表及図 2 に各 x の値に対する y 及び D の値を示す。

x	y	$D \text{ m/s}$
- 0.78	0.05	226
- 0.45	0.07	318
- 0.22	0.10	454
0	0.20	908
0.31	0.40	1,820
0.54	0.60	2,720
0.85	0.80	3,640
1.17	0.91	4,130
1.78	0.96	4,360

第 2 図



即ち $x=0$ の c 点から 1 耗の点で y は 0.9, 2 耗の点では 0.96 となつて、 c 点から爆速の上昇率は極めて大きい。即ち c 点から 1.8 耗の点即ち爆粉面より 4.4 耗で、4,300 m/s の爆速に達している。此の 4.4 耗は、R. G. Vines が金属板上で爆薬を爆発させる場合、爆真で求めた完爆迄の距離、即ち Anlaufstrecke と略一致する筈である。木下氏が工業雷管で求めた Anlauf-Strecke は導火線で点火した場合 5 耗という結果を得ているが、之は上述の 4.4 耗と良い一致を示して居る。工業雷管(六号)では爆粉は 0.4 g 使用して居るから、 c 点即ち原点から 4.4 耗ある事になる。従つて殆ど最高爆速

$$4,510 \times 0.969 = 4,360 \text{ m/s}$$

になつて居ることになる。

粉末を圧搾すると、(第四報)で圧搾粉末の下部では装填比重が低くなるので、最大爆速も、4,000 m/s 附近に下るものと思われる。

F. P. Bowden 氏に依れば、雷管は 2 段の反応が起り、最初は 250~300 m/s の速度で進行すると称して居るが、之は上の計算で行くと x は (-0.5) 耗で爆粉面から約 2 耗の点に当り、之から急激な第二段の反応が起きて来るものと思われる。

IV 爆粉の死圧

工業雷管内の爆粉は、装填比重が2.25の場合には、前項の計算に従い、140 m/s以上の反応速度に達すれば爆発に移る事をみたが、爆粉の比重がますます、例えば雷管の真比重に近い、 $\Delta=4.5$ では理想爆速は6,540 m/sとなり、 $y_0=0.031$ とすれば最小速度は204 m/sとなる。元来固体混合物の燃焼速度は装填比重に略々逆比例する(若木氏・工火 23 p. 127 其他筆者の未発表実験)従つて爆粉比重の増加と共に益々最小速度に達しにくく遂に所謂死圧の現象を呈するものと思われる。但し204 m/s ($\Delta=4.5$)以上の速度を生ずる様な強い衝撃が与えられれば、爆発進行の条件即ち(1)式が満足されるから爆発は起る。

今圧縮圧力を変化した爆粉に就て、テトリルに対する発火率から臨界爆粉量を求めると、

圧縮圧力 (kg/cm ²)	100	200	300	400	500
臨界爆粉量 (g)	0.14	0.15	0.18	0.21	0.25

圧力が上昇するに従つて、臨界爆粉量は換物線的曲線を逆つて急激に増加し、700 kg/cm²以上では0.4 g以上となる為、普通の工業雷管では爆発しなくなり、一般に死圧なりと称せられる様になる。故に死圧となつた爆粉は、薬量を増加して装填比重の小さな雷管を前に置き、之に点火させれば、完爆させる事が出来る

V 爆粉より添装薬への爆速変化

六号雷管では爆粉最後の爆速は、前項で計算した如く4,360 m/sであるから、(2)に依り

$$P V_0 / W = D = 4360 \dots\dots\dots (16)$$

及び $P / W^2 = 0.153$

此の式から爆粉内の P 及 W を求めると、

$$W = 645 \text{ m/s}, \quad P = 62,081 \text{ atm} \dots\dots (17)$$

R. Becker氏が装填比重2.65の雷管が爆発した場合爆轟圧力70,000 atm 瓦斯の流速655 m/s、爆速4,120 m/sを得ているが、之は(17)の値と良く一致して居る。

今爆粉は完爆して居るから、此の場合のRarefaction waveの式は

$$W - W_1 = \frac{2U_1}{\gamma - 1} \times \frac{V_1 - \alpha}{V_1} \times \left[1 - \left(\frac{P}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \right] \dots (8)$$

V_1 は第五報の(14)から

$$V_1 = V_0 \times \frac{\gamma + \alpha / V_0}{1 + \gamma} = 0.444 \times \frac{1.3 + 0.276 / 0.444}{1 + 1.3} = 0.37$$

U_1 は第五報の(13)から

$$U_1 = V_1 \times \sqrt{\frac{\gamma P_1}{V_1 - \alpha}} = 3,500$$

故に此等の値を(8)に代入して W_1 を求めれば

$$W_1 = 640 \text{ m/s} \dots\dots\dots (18)$$

(18)を(8)に代入すれば爆粉が爆発した場合のrarefaction wave式が得られる。

$$W - 640 = 5950 \times \left[1 - \left(\frac{P}{62700} \right)^{\frac{0.3}{2.6}} \right] \dots\dots (19)$$

又(10)式に於てテトリルの場合 $V_0 = 0.833$, $\alpha = 0.525$ を代入すれば

$$P / W^2 = 0.0745 \dots\dots\dots (20)$$

(19)と(20)から P と W を求めると

$$P = 50,000 \text{ atm}, \quad W = 820 \text{ m/s}$$

此の P と W の値を(2)に代入すれば完爆した爆粉の衝撃を受けた装填比重1.2のテトリルの爆速が得られる。

$$D = \frac{P}{W} \times V_0 = 5150 \text{ m/s}$$

即ち爆粉から4,360 m/sの衝撃を受けたテトリル ($\Delta = 1.2$)は、5,150 m/sの爆速から出発する事となる。

以上の計算は、工業雷管に於て直径6耗の円形爆粉面が直径6耗の円形テトリル面と完全に接触して居る場合であるが、此の間に少しでも妨害物があれば、爆粉の爆速4,360 m/sが完全にテトリルに伝わらないからテトリル面はより低い爆速で出発する事となり雷管底部の爆速は減少し従つて雷管の威力は低下する。工業雷管に於て上向内管及び二重内管を使用した場合、雷管威力の低下する事は既に数氏によつて実験された結果が発表されて居る。之は内管が爆粉とテトリルの間にある為に妨害されて、爆粉の爆力が十分にテトリルに達しない事に原因するものと思われる。即ち爆粉とテトリルに達しない事に原因するものと思われる。即ち爆粉とテトリルは十分に接触する様計画しなければならない。

VI 添装薬内の爆速

添装薬テトリルの反応帯長は1耗で、装填比重1.2の理想爆速は6,440 m/sであるから、最高爆速を求めると第六報の(9)から、

$$D_2 = 6440 \times \left[\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1 \times 0.45}{3}} \right] = 5,270 \text{ m/s}$$

即ちテトリル ($\Delta = 1.2$)の爆速は5,270 m/s以上になる事は無い。

テトリル内の爆速変化を調べる為、先づ臨界爆粉量の場合を考えると、テトリルは臨界爆速1,190 m/sから出発することとなるから、此の場合の爆速比は0.184である。故に $y_0 = 0.2$ を原点と考えて y と x との関係を求めると(13)式は、

$$\log \frac{y - 0.184}{0.816 - y} + 1.415 = 0.211 x \dots\dots (21)$$

x の色々な値から y を求め、臨界爆速6,440 m/sから各点の爆速 D を計算すると、次表の如し。

y	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
x	0	3.54	5.32	6.72	8.05	9.79	14.21
D	1,290	1,940	2,580	3,220	3,870	4,510	5,150

之を图示すると図3の実線($\Delta=1.2$)に示す如く、緩やかな曲線を辿つて上昇して行く。6号雷管ではテトリルを0.45g使用し、その長さは12耗であるから、臨界爆粉量の場合には薬長12耗となるので爆速は5,000 m/sとなつて最大爆速の5,270 m/sより約5%低い。

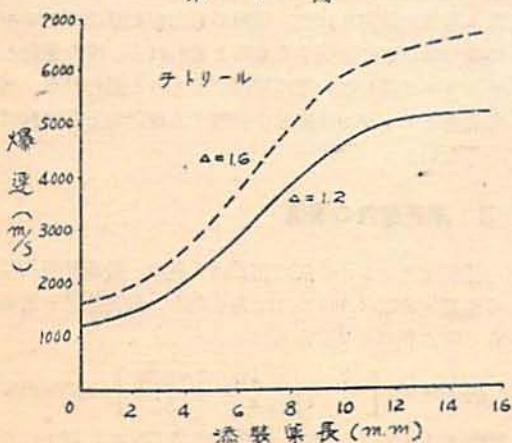
然るに実際は、工業雷管の爆粉量は0.4gであるから、テトリルは計算により5,150 m/sより出発して居るので $y=0.8$ を $x=0$ の点と考えれば良いから、直ちに増加して添装薬長12耗では充分に最大爆速5,270 m/sに達して居るものと思われる。故に雷管の底部では5,270 m/sの爆速を生ずる。実際に工業雷管では、テトリル0.45gを二回に分けて圧搾して居る。即ち0.225gのテトリルを毎回 $P_0=100$ kg/個の圧力で圧搾し、直径6耗、高さ6耗の薬柱を作つている。故に下端に於ける低下した圧力 P を第四報の圧搾粉末の式から計算すると、

$$P = P_0 e^{-\frac{2m\mu l}{r}}$$

$r=3$, $l=6$, $m\mu=0.05$ として上式に代入すれば、
 $P/P_0=0.85$

圧力は底部で15%低下する。故に圧搾圧力と比重から計算すると、テトリル比重は下部で1.15となる。

第3図



Fundamental Researches on Mercury-Fulminate Blasting Caps.

(VII) The Detonation Velocity in the Blasting Cap.

By Takeichi Mataka.

From the equation representing the relation between the detonation distance x and the detonation velocity ratio $y=D/D_0$, the detonation state in the blasting cap was studied. In order to initiate the tetrazol ($\Delta=1,2$) in the blasting cap, the final detonation velocity of priming composition must be over 900 m/s. This velocity is attained by the critical amount of priming composition 0.15 g, and it corresponds the distance of 2.6 mm from the surface of the priming composition. As the reaction zone length of the priming composition is very short, the detonation velocity increases rapidly and becomes 4,300 m/s at 4.5 mm distance. In tetrazol, the detonation velocity increase slowly and reach 4,800 m/s at the bottom of the blasting cap.

$\Delta=15$ の理想爆速は 5,870 m/s であるから、最大爆速は
 $5870 \times 0.816 = 4800$ m/s

W. Shepherd 氏は装填比重 1.1 の硝子管入テトリルを雷管で爆発させ、4,680 m/s の爆速を得て居るが、上の値と略一致している。但し雷管底部の凹部は爆速が成されるので jet の速度は 10,000 m/s にも達して居る。

尙テトリルの装填比重を増加して 1.6 になれば、最大及最小爆速は共に増加し、 x と D の関係は図3の点 ($\Delta=1.6$) 線に示す如く、 $\Delta=1$ より著しい爆速の増加を示している。

VII 結 論

1. 添装薬の臨界爆速はテトリルで $\Delta=1.2$ の場合 1,190 m/s, $\Delta=1.6$ の場合 1,520 m/s, トロチルでは $\Delta=1.2$ で 2,460 m/s であるから、臨界爆粉量はテトリルよりトロチルの方が多くなる。之は実験結果と一致する。
2. $\Delta=1.2$ のテトリルに臨界爆速、即ち最小爆速を与える爆粉の爆速は約 900 m/s である。
3. 爆粉の爆速が 900 m/s に達する爆粉量は 0.15 g で、工業雷管の爆粉面から 2.6 耗の位置に当る。
4. 爆粉の爆速 D と理想爆速 D_0 との比 y と爆粉距離 x との間には、次の関係式が成立する。

$$\log \frac{y-0.031}{0.969-y} + 0.66 = 1.56x$$

5. 爆粉は爆粉面から 2~4 耗の間で著しい爆速の上昇が起り、5 耗で爆粉の安定爆速 4,360 m/s に達する。
6. 爆粉は最初燃焼して居るから、装填比重を増加するに従い燃焼速度は小さくなる結果、臨界速度に達し難くなつて、臨界爆粉量は急激に増加し、所謂死圧の現象を呈す。
7. テトリルが臨界爆速から出発した場合、 y は次の関係式に従い x と共に増加す。

$$\log \frac{y-0.184}{0.816-y} + 1.415 = 0.211x$$

8. 爆粉と添装薬との間に内管等の妨害物を置くと、雷管の威力が低下する。