

フタリ混合物の混和時間による感度変化の推移は、発火点、落錠及び砂上殉爆試験では明確に知ることが困難であるが、雷管方式による感度試験法により第4表第8表及び第2図に示す如く判然と、これを知ることが出来た。

2 第2図の曲線を見ると、曲線(1)は曲線(2)に比して急激に降下している。換言すると実験(その1) 硝安—ジエトロナフタリン混合物の方が感度が大きい。これは使用したジエトロナフタリンの性状(組成、臨点等)の差によるものであろうか。本試験

法により工業用ジエトロナフタリンの、性状の差による、鋭感剤としての性能を調査することも出来るであらう。

3 この雷管方式による感度試験法は、他の一般火薬類にも拡張適用することが出来ると考えられる。

終りに本実験に協力された吉岡市三郎、山元力馬氏に感謝する。

(本報告は昭和26年10月27日西部支部大会にて発表した)

An Experimental Method on the Sensitivity of Explosives

by Teizo Okawa, Hirohiko Yoshitomi

About the changes of the sensitivity of NH_4NO_3 -DNN mixture during the manufacture of ammonium nitrate explosives, we could not get good results by the explosion test, drop hammer test and gap test.

Good results were obtained by the following "blastingcap type" method. In a shell of No. 6 blasting cap, instead of the detonating composition, 0.4g of the sample are placed and between the sample and the priming composition, some amount of hexogen are put as a booster.

The minimum weight of hexogen by which the sample can detonate completely is determined.

(Asahi Kasei K. K. Nobeoka Factory)

雷管雷管の基礎的研究

(第6報爆発の進行に就て)

(昭和26年月5日23受理)

又 木 武 一

(帝國火工品製造株式会社川越工場)

I 緒 言

第五報に於て爆薬の達し得る理想爆速(D_i)に就て理論式を導き、実測爆速(D)と比較した処、 D/D_i はテトリル 0.95、トロチル 0.90 となつて爆薬の爆速が理論爆速に達する事の困難である事を認めた。この原因を調査する為 Eyring の Curved Front Theory に従い爆発層と、未反応層との間に一つの反応帯を考へて此の反応帯の長さや爆速の關係式から爆発の成立する條件及最大並最小爆速を求めて各種火薬の反応帯長を計算した。反応帯長は起爆薬は 1/10 耗

程度、高性能爆薬は 1~2 耗、低爆速の爆薬では 10 耗附近となつて居て、反応帯長により火薬を A, B, C, D の4つに区分する事が出来る。

最後に爆発熱小なる硝酸アンモンが装填比重の増加に従い爆発が困難となる原因に就て簡単に検討して、次に報告する工業雷管内に於ける爆速進行状況調査の基礎を作つた。

II 爆発距離と爆速

或棒状の爆薬が一定の爆発エネルギーを受けた場合、距離 x に於ける爆速を D 、反応帯長を a とすれ

ば、爆速の変化は Eyring 氏によれば次の式で表わされる。

$$a \frac{dD}{dx} = k_1 (D_s - D) \quad (1)$$

但し D_s はその状態に於ける安定爆速を示し、 D は最後には D_s に達する。次に理想爆速を D_i 火薬の半径を R とすれば安定爆速の式は、同じく Eyring 氏の略近を採用すれば、

$$D_s/D_i = 1 - k_2 \frac{a}{R} \quad (2)$$

k_2 は容器の強度に逆比例し極めて弱い場合は 0.5、極めて強い場合は 0.1 となる。更に爆速と反応帯長との間には次の関係がある。

$$\frac{a}{a_i} = \frac{D_i}{D} \exp \frac{\Delta H}{R_0 T_i} \left[\left(\frac{D_i}{D} \right)^2 - 1 \right] \quad (3)$$

但し a_i は理想爆速の反応帯長、 ΔH は活性化熱、 T_i は爆発温度、 R_0 はガス常数なり。然るに爆発過程に於て爆発温度が極めて高い場合には $\frac{\Delta H}{R_0 T_i}$ は殆ど零に近いから (3) 式は

$$\frac{a}{a_i} = \frac{D_i}{D} \quad (4)$$

(1), (2) 及 (4) から D と x の関係を求めると

$$\frac{dD}{D^2 - D_i D + \frac{a_i D_i^2}{R} k_2} = - \frac{k_1}{a_i D_i} dx$$

即ち

$$\frac{dD}{\left(D - \frac{D_i}{2} \right)^2 - D_i^2 \left(\frac{1}{4} - \frac{a_i k_2}{R} \right)} = - \frac{k_1}{a_i D_i} dx \quad (5)$$

$$\text{今 } D/D_i = y, \quad \frac{1}{4} - \frac{a_i k_2}{R} = A \quad \text{とすれば}$$

$$\text{爆発が進行する為には (5) 式から } \frac{dD}{dx} > 0$$

であるから

$$\left(\frac{1}{2} - \sqrt{A} \right) < y < \left(\frac{1}{2} + \sqrt{A} \right) \quad (6)$$

でなければならぬ。 A が負の場合には $\frac{dD}{dx}$ は常に負となるから

$$\text{爆発成立の条件 } A > 0 \quad (7)$$

$$\text{今 } y_1 = \frac{1}{2} - \sqrt{A} \quad (8)$$

$$y_2 = \frac{1}{2} + \sqrt{A} \quad (9)$$

とすれば y は前の条件から y_1 と y_2 の間にあるから、 $y_1 D_i$ を最小爆速 $y_2 D_i$ を最大爆速と考える。即ち爆速が最小爆速より大きければ爆発は進行するが之より小さい場合には爆発は中断されて進行しないので結局爆発中断の条件は

$$D < y_1 D_i \quad (10)$$

R 及 k_2 が分れば理想爆速 D_i は第五報から計算出来るから y_1 又は y_2 を求めることにより (8) 又は (9) から反応帯長 a_i が求められる。即ち y は y_1 と y_2 の間に存在し x の増加に従い段々と y_2 に近づくものと思われる。前報に於てはテトリルで 0.95, トロチルで 0.90 を得た。

(5) 式を積分すると $A > 0$ ならば

$$\frac{1}{2\sqrt{A}} \log \frac{\sqrt{A} + \left(y - \frac{1}{2}\right)}{\sqrt{A} - \left(y - \frac{1}{2}\right)} = \frac{k_1 x}{a_i} + C$$

此の式に於て初期条件即ち $x=0$ に於ける爆速を D_0 , D_0/D_i を y_0 とすれば

$$\frac{1}{2\sqrt{A}} \left\{ \log \frac{\sqrt{A} + \left(y - \frac{1}{2}\right)}{\sqrt{A} - \left(y - \frac{1}{2}\right)} - \log \frac{\sqrt{A} + \left(y_0 - \frac{1}{2}\right)}{\sqrt{A} - \left(y_0 - \frac{1}{2}\right)} \right\} = \frac{k_1}{a_i} x \quad (11)$$

k_1 は 0.333 である。最大爆速を増す為には、 D_i 及 R を大きくする事であり、又 a_i, k_2 を小さくする事である。先づ D_i を大きくするには、装填比重を大きくする事で、既に第五報に報告して居る。後に之を応用して威力の強い A 型雷管を完成した。 R の大きさに依る影響を見る為、新鋼ダイナマイト及硝安爆薬に就て、薬包の直径を 25 耗, 32 耗, 42 耗, と変化して爆速を測定した処、次表に示す如く薬径が大きくなるに従つて増加して居る。

薬径	硝安爆薬	新鋼ダイナマイト
25 耗	2,210 m/s	6,000 m/s
32 耗	2,260 耗	6,850 耗
42 耗	2,600 耗	7,500 耗

反応帯長 a_i に就ては後項に報告するが、 $y = D/D_i$ がテトリルは 0.95, トロチルは 0.90 と差があるのも、前者の a_i が 1.0 耗、後者が 1.6 耗と差のある事に原因すると思われる。最後に k_2 を小さくする事は火薬の容器を強くする事である。既に第二報 (工火 29, p. 96) で報告した如く工業雷管の管体として材質の弱い肉厚 0.17 耗のアルミニウムを使用すると臨界爆粉量は 0.32 g と極めて大きい。肉厚 0.17 耗の鋼なれば 0.19 g 肉厚 0.22 耗の真鍮なれば 0.16 g となる。即ち管体が丈夫になるに従つて k_2 が小さくなる為、爆速が大きくなつて完燃し易くなる結果臨界爆粉量が減少すると思われる。又装填比重 1.0 の各種火薬を鋼管及紙筒の中で爆速を測定して見ると、前者の k_2 は 0.1 に近いが後者は 0.5 に近いので次表に示す如く前者の方が爆速は大きくなつて居る。特に紙筒の場合には爆発の条件を満足させない為か反応帯長の長い

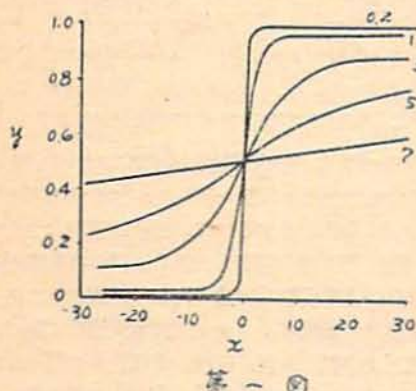
ものでは不発となる。

	ペント リット	テト リル	トロ チル	カー リット	NH ₄ ClO ₄	N/C (N=10.35)	N/C (N=8.66)
鋼管	5,810	5,690	4,930	4,388	3,520	5,330	4,350
紙筒	5,680	5,650	4,570	3,705	不爆	4,930	不爆

次に爆発距離 x と爆速 y の関係を見る為 (11) 式に於て $(y_0 = \frac{1}{2})$ を原点と考えれば次式で表わされる。

$$\frac{1}{2\sqrt{A}} \log \frac{\sqrt{A} + (y - \frac{1}{2})}{\sqrt{A} - (y - \frac{1}{2})} = \frac{k_1}{a_i} x \quad (12)$$

今横軸に x 、縦軸に y を取つて各 a_i に対するグラフを画くと、第1図に示す如く a_i が小さくなるに従つて



曲線の上昇が急激となる。即ち雷索の如く a_i が 0.2 耗と小さいものは x の極めて短い範囲で急上昇し、amatol の如く $a_i=10$ 耗と大きいものでは上昇が遅い。尚第1図に於て曲線の数字は a_i の数値を示す。

III 爆発の進行条件

爆発が進行する条件は前に得た式により

$$A = \frac{1}{4} - \frac{a_i k_2}{R} > 0$$

今新銅ダイナマイトを紙筒の儘爆発させた場合に爆発が進行する直径 $2R$ は上式に $k_2=0.5$, $a_i=3.3$ 耗 (後述) を代入すると

$$2R > 2 \times 4 a_i k_2 = 2 \times 4 \times 3.3 \times 0.5 = 13.2$$

即ち新銅の直径は 13.2 耗以上なければならぬ。実際に薬径を変化して爆速を測定してみると、14耗以下では不発となつた。之は上式の正しい事を実証するものである。

又硝酸アンモンに就て考えると a_i は 14耗であるから最も弱い紙筒の薬包では $k_2=0.5$ であるから、上式に従つて計算すると $2R > 56.0$ 即ち 56 耗以上無いと爆発が進行しない。次に余り厚くない鋼管を使用し

た場合には $k_2=0.2$ として同様に計算すると、 $2R > 22.4$ 即ち 23 耗以上あれば爆発が起る。Belyaev の実験に依れば硝酸アンモンは紙筒の場合薬径 80~100 耗以上で、又コンクリートで包んだ場合は30耗以上で安定な爆速を得て居る。試験条件が余り明確でないが、計算と誤差の範囲で一致し上式の適用出来る事を認める。

更に導爆線に就て考えて見ると薬の直径は3耗と極めて小さい。又薬の周囲は被覆されて居るから、 $k_2=0.2$ として爆発が進行する為の反応帯長 a_i を上式で求めると $a_i < 1.87$

即ち反応帯長は 1.8 耗以下でなければならない。反応帯長は後述する如く、トロチルは 1.6 耗ピクリン酸は 1.5 耗で此の条件に適するので、従来使用されて来た訳である。然し被覆の弱い場合、若くは薬径の小さな場合には、反応帯が更に小さなペントリット ($a_i=0.7$ 耗) 等を使用しなければならない。反応帯が2耗以上の硝酸アンモンや amatol 等は当然導爆線には使用出来ない。

IV 最小爆速

最小爆速 D_1 は (8) 式に従つて

$$D_1 = D_0 \left\{ \frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{a_i k_2}{R}} \right\}$$

爆速が最小爆速以下では爆発は中断される訳であるが、其の臨界爆速を求めた実験は非常に多い。M. Marcel Patry (Combustion et detonation des substances explosives (1933)) が爆轟の伝達距離に就て実験した結果、硝子管 (内径7耗) に装填されたピクリン酸 ($\Delta=0.9$) は、爆速が 1,500m/s 以下では爆轟が伝達しない事実がある。この場合これは最小爆速を示すと見て良い。 $\Delta=0.9$ のピクリン酸は第5報に従い $D_0=4,920$ m/s であるから、 $k_2=0.5$ として上式から反応帯長を求めると $a_i=1.5$ 耗を得る。

又トロチルに就ては、直径 10 耗の硝子管に $\Delta=1.0$ で実験し、最小爆速 1,120m/s を得て居る。 $D_0=5,440$ m/s であるから同様に計算すると、 $a_i=1.6$ 耗を得て居る。Eyring 氏は高性能爆薬の反応帯長を1耗附近と報告して居るが、上に得た結果と略一致する。

最後に D. B. Gowthrop 氏は硝酸アンモンを厚味 4.84 耗の鉄管に装填し、装填比重 0.73 で最小爆速 1,002m/s を得て居る。之から硝酸アンモンの反応帯長を求めると、 $a_i=14.4$ 耗となつて極めて大きい。

V 最大爆速

爆発が完全に行われた場合には、最大爆速が得られ之以上に達する事は無い。最大爆速は (9) 式に従つて

$$D_2 = D_1 \left\{ \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{a_1 k_2}{R}} \right\}$$

前項と同様に R, k_2 が分れば a_1 が求められる。

先づピクリン酸に就て考えると、M. Marcel Patry 氏の実験によると内径 7 耗の硝子管に $\Delta=0.9$ で装填したピクリン酸は、最後に 3,500m/s の爆速に達して居る。即ち之を最大爆速 D_2 として $k_2=0.5$ で (9) に代入して、反応帯長を求めると $a_1=1.4$ 耗となる。之は前項で得た 1.5 耗と極めて良く一致した値を示して居る。即ち爆速の式 (8) 及 (9) は正しい事を確認した訳である。

次に工業雷管の添装薬として使用されるテトリールに就ては Patry 氏が内径 13 耗の硝子管に $\Delta=0.9$ で装填したものに就き実験し、最大爆速 $D_2=5,000$ m/s を得て居る。 $D_1=5,340$ m/s であるから、 $k_2=0.5$ として式から計算した処 $a_1=0.8$ を得た。更に低比重の場合、 $\Delta=0.65$ で $D_2=4,000$ m/s、 $\Delta=0.55$ で $D_2=3,700$ m/s を得て居るから、之から反応帯長を求めると夫々 a_1 は 1.05 耗、1.08 耗を得た。此の三者を平均すると、テトリールの反応帯長は約 1 耗である。

更に起爆薬として雷汞の場合を考えると、M. M. Patry 氏が直径 13 耗の硝子管に雷汞を装填し ($\Delta=1.5$) $D_2=3,300$ m/s を得た。 $\Delta=1.5$ の D_1 は前報の計算に依り 3,350m/s であるから計算を行うと、 $a_1=0.2$ 耗となり、他の爆薬に比し著しく小さな値を示して居る。Eyring 氏も起爆薬及びニトログリセリンは 1/10 耗程度で最も小さいと称して居るが、上の結果も之を裏書きして居る。

混合爆薬として新桐ダイナマイトに就て実験した処薬径 32 耗の新桐 ($\Delta=1.42$) に於て最高爆速 6,800m/s を得た。理想爆速を計算すると、 $D_1=7,870$ m/s であるから、同様に反応帯長を求めると、 $a_1=3.3$ 耗となつてテトリール等の高性能爆薬よりも稍大きな値を示して居る。

VI 硝酸アンモンの爆速

硝酸アンモンに就て、厚味 4.84 耗直径 26.2 耗の鉄管内に硝酸アンモンを装填し、($\Delta=0.73$) 最大爆速 2,000 m/s を得た。 D_1 は 3,030 m/s であるから之から反応帯長を求めると、 $a_1=13.6$ 耗となる。之は前に得た 14.4 耗と略一致し、平均 14 耗となつて爆薬中最大である。実際に硝酸アンモンが中々完爆し難いのも、反応帯長が長い事に原因するものと思われる。今直径 30 耗の硝酸アンモンの紙筒が爆発する条件、即ち k_2 の値を求めると

$$A = \frac{1}{4} - \frac{a_1 k_2}{R} = \frac{1}{4} - \frac{14 \times k_2}{15} = 0$$

$$\therefore k_2 = 0.23$$

即ち k_2 が 0.23 以上の場合は不爆となるから容器は相当に強くしなければならない。尚爆発の進行条件として導いた A は、(3) の代りに (4) を用いたが、硝酸アンモンの如く爆発熱も爆発温度も低い場合には

$\frac{\Delta H}{R_0 T}$ は或値を示すから、之を零と見做す事は出来ない。且又 a_1 が大きいので、 $\left(\frac{D_1}{D}\right)$ も著しく大きくなるから、(3) を使用しなければならない、従て

$\exp\left\{\left(\frac{\Delta H}{R_0 T_1}\right)\left\{\left(\frac{D_1}{D}\right)^2 - 1\right\}\right\}$ は 1 より大きくなるから之から計算すると、硝酸アンモンが完爆する為には、 k_2 は更に大きくなるので、実際には益々爆発が困難となる。

次に硝酸アンモンの最小爆速に就て考えると、(D_1/D_0) は 0.334 で装填比重が 0.73 の場合 D_1 は 1,002 m/s であるが、装填比重が 1.4 になると D_1 は増加して 4,560 m/s となるから、最小爆速も 1,520 m/s と増加する。即ち 1,520 m/s 以上の爆速が出る様な衝撃を受けないと、硝酸アンモンの爆発は中断される。即ち装填比重が増加するに従つて爆発し難くなる。硝酸アンモンの比重を変化して爆速を測定して見ると、装填比重が 0.9 以上では不爆となる。之は上述の如く最小爆速の増加によるものと考えられる。然るに硝酸アンモンと化合して爆発温度を高める様な物質、例えばアルミニウム等を混入すれば、爆発温度は上昇し、

且反応帯長も短くなる為 $\frac{\Delta H}{R_0 T_1} \left\{ \left(\frac{D_1}{D} \right)^2 - 1 \right\}$ は 0 に

近づくので、(4) 式の適用が可能となり、爆発が進行し易くなる筈である。今硝酸アンモンに 10% のアルミニウムを加えると、硝酸アンモンのみでは不爆となる装填比重 1.2 に於ても完爆し、約 3,000 m/s の爆速を得た。之は上述の如く、爆発熱の増加に原因するものと思われる。

VII 反応帯の長さ

前項迄に計算した結果に依ると、反応帯の長さは 0.1 耗から 14 耗の広い範囲に亘つて居るので、反応帯長に依て火薬を次の四つに区分した。最も短い 0.5 耗以下を A 級、0.6~2.0 耗を B 級、2.1~7.0 耗を C 級、7.1 耗以上を D 級として各級に属するものを次に示す。

イ A 級 最も反応の激しいもので、雷汞の 0.2 耗、ニトログリセリンの 0.1 耗の如く起爆薬や鋭感な火薬が之に属し、衝撃により容易に爆発を起す傾向があるので、取扱に非常な注意を必要とする。

ロ B 級 テトリール (1.0 耗) ピクリン酸 (1.5 耗)、ヘキソゲン (0.8 耗) トロチル (1.6 耗) 等で、威力の大きなニトロ化合物が之に属し砲弾並爆薬等の炸薬及び伝爆等として使用

されるが、一般に高価であるから、工業雷管の添装薬其の他混合爆薬の成分として工業的に使用される。

- ハ C級 新洞ダイナマイト(3.3耗)Minol 2 (5.4耗)等の爆薬が之に属し主として爆速の高い鉱山爆薬等に使用されて居る。
- ニ D級 ニトログアニジン(8.8耗), アマトール (10耗) 硝安ダイナマイト (8耗), 硝安爆薬 (14耗) 等の低爆速の爆薬が之に属し、炭鉱爆薬等に使用されて居る。

以上反応帯長に依て、火薬を A, B, C, D の四級に分類する事が出来たが、火薬の性能に依る区分と良く一致して居る。一般に無機の酸化物を多量に含有し、且之を主成分とするものは反応帯長が長い様である。

VII 結 論

1. 薬径を $2R$, 反応帯長を a_1 とすれば、爆発進行の條件は

$$A = \frac{1}{4} - \frac{a_1 k_2}{R} > 0$$

但し k_2 は容器の強度に關係する常数なり。

2. 理想爆速を D_1 とすれば

$$\text{最大爆速 } D_2 = D_1 \left(\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{a_1 k_2}{R}} \right)$$

$$\text{最小爆速 } D_1 = D_1 \left(\frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{a_1 k_2}{R}} \right)$$

3. 最小爆速以下の爆速では爆発は中断する。

4. $x=0$ に於ける $y (=D/D_1)$ を y_0 とすれば、 y と x の間には次の關係式が成立する。

$$\frac{1}{2A} \left\{ \log \frac{\sqrt{A+y} - \frac{1}{2}}{\sqrt{A-y} + \frac{1}{2}} - \log \frac{\sqrt{A+y_0} - \frac{1}{2}}{\sqrt{A-y_0} + \frac{1}{2}} \right\} = \frac{k_1 x}{a_1}$$

但し k_1 は 0.333 なり。

5. 爆速を増加する為には、薬径を大きくするか、火薬の容器に丈夫なものを使用しなければならない。
6. 最大爆速及最小爆速から反応帯長を求めた処、ピクリン酸は 1.5 耗、トロチルは 1.6 耗、テトリールは 1.0 耗、雷汞 0.2 耗、硝酸アンモンは 14 耗を得た。
7. 硝酸アンモンが比重増加に従い不爆となる原因を探究し、爆発熱を高める様な物質、例えばアルミニウム等を混入すれば爆発の進行する事を確認した。
8. 反応帯長に依り火薬類を A, B, C, D の級に分類した。

Fundamental Researches on Mercury-Fulminate Blasting Caps.

(VI) The Development of the Detonation Velocity.

By Takeichi Mataka.

Considering the reaction zone according to the Eyring's theory, we describe the next relation, (concerning the detonation ratio $y=D/D_1$ and the explosion distance x)

$$\frac{1}{2\sqrt{A}} \left(\log \frac{\sqrt{A+y} - \frac{1}{2}}{\sqrt{A-y} + \frac{1}{2}} - \log \frac{\sqrt{A+y_0} - \frac{1}{2}}{\sqrt{A-y_0} + \frac{1}{2}} \right) = \frac{k_1 x}{a_1}$$

$$\text{with } A = \frac{1}{4} - \frac{a_1 k_2}{R}, \quad 2R = \text{dia. of explosives,}$$

y_0 = detonation velocity ratio at $x=0$,

k_2 = constant on vessel.

a_1 = reaction zone length

the condition for explosion to proceed

$$A > 0$$

the maximum detonation velocity

$$D_2 = D_1 \left(\frac{1}{2} + \sqrt{A} \right)$$

the minimum detonation velocity

$$D_1 = D_1 \left(\frac{1}{2} - \sqrt{A} \right)$$

The calculated reaction zone from the values of detonation velocity are found to be 1mm for tetryl, 1.6mm for trotyl, and 0.2mm for mercury-fulminate. In order to increase the detonation velocity, we must enlarge the dia. of explosives, and increase the vessel strength as well as loading density.

(Teikoku Kakōhin K.K.)