

\* 鑄型 1 ton を破砕するに要する經費

本試験の範圍では鑄型 1 ton 當りの火薬類の費用は 52 圓 (火薬は新銅ダイナマイト 3 本 (1 本 110 g) 45 圓) 雷管 1 個 7 圓) である。今 1 日に 2 名で鑄型 80 ton 處分出来るとすれば工數及雜費を含めて 1 ton 當り 100 圓以下で破砕出来るものと思ふ。従つて現在實施されてゐる機械的破砕法 (1 ton 當り 300 圓程度) と比較する時經費の點でも時間の點でも格段の相違がある。

#### IV 結 言

今回の試験によつて水を満すことの出来る容器で機械的に破砕することの困難なものは水爆發破によつて簡易迅速に然も安價に破砕出来ることが判つた。但し此の場合容器の高さ以上の高さの防壁又は土壁の内で作業することが安全である。

本試験に際し種々御協力を賜つた大同製鋼株式會社築地工場長神邊氏及同工場第一製造課長吉田氏並に本試験に従事された日産化學工業株式會社武登工場研究課の原田、早坂、杉浦、上村、田村の諸君に深く感謝する。

## 火薬類の爆速に関する研究

(昭和 18 年 7 月 10 日受理)

會 員 日 野 熊 雄\*

### 目 次

#### I 緒言

#### II 爆速の理論

##### (1) 單體火薬類の爆速

1. 従來の爆速式
2. 熱力學的考察
3. 反應速度論的考察

##### (2) 二成分系火薬類の爆速

1. 従來の研究
2. 二成分系火薬類の爆速
3. 裝填密度と爆速
4. 混合率と爆速

#### III 爆速の實驗的研究

##### (1) 爆速の測定法

##### (2) 單體火薬類の爆速

1. 従來の研究
2. 裝填密度と爆速
3. 薬温と爆速
4. 容器の強度と爆速
5. 火薬類の死壁に関する考察

##### (3) 二成分系火薬類の爆速

1. 従來の研究
2. 裝填密度と爆速

##### 3. 混合率と爆速

##### 4. 爆速式に関する考察

#### IV 爆速の微細構造

- (1) 一般
- (2) 高速旋回轉寫鏡に依る實測
- (3) 爆轟スピンに関する考察

#### V 火薬類の猛度

- (1) 一般
- (2) 全衝動量の計算

#### VI 總括

### I 緒 言

火薬類は與へられたるエネルギー量の大小及其の速度に依り種々の形式に依り反應す、與へられたるエネルギー小なる場合は少數の分子の分解を生ずるに過ぎず、熱分解等之なり、更に大量のエネルギーが焔、電氣等に依り與へらるれば火薬類は一般に燃燒す、一局部の燃燒に依り生じたるガス分子は隣接未燃燒層を活性化し火薬類は火薬分子の活性化エネルギー、燃燒温度、薬温、燃燒壓力、火薬の形狀に依り定められたる一定の法則に従ひ規則正しく燃燒し其の速度は一般に大氣壓下にて數 mm/sec なり。更に加へられたるエネルギーが大且急激の場合には火薬類は發射薬たると爆薬たるとを問はず爆轟す。

\* 現在日本化薬株式會社

燃焼に於ては燃焼面より直に生成ガスは膨脹するに對し爆轟の傳播の際の生成ガスは爆轟波面に於ては強度の壓縮を受け此の衝撃が火薬類内の音速以上の高速度を以て化學反應を伴つて進行す、此の爆轟速度は起爆エネルギーが十分なる場合は直ちに定常値を採り一般に數 1000 m/sec の數値を有し巨大なる壓力を發生す、爆轟し終れる火薬類は次に膨脹し仕事威力を示す、火薬類の燃焼に關しては理論的及實驗的に詳細なる研究<sup>1)</sup>が行はれ燃焼速度は壓力に比例すること實證せられたり、爆轟速度に關しては燃焼速度に比し其の研究は困難なるも火薬類の破壊威力殊に其の衝撃威力又は強度は爆轟速度に依り決定的に支配せられ爆轟速度の理論的及實驗的研究は實用上及火薬學理論上も極めて重要なり、火薬類には爆轟の生起の難易に著しき差を有する二種類<sup>2)</sup>のものあり、單なる着火に依て迅速に爆轟する性質を有するものを起爆薬と稱し雷索、窒化鉛等之に屬す。又強力なる衝撃に依りはじめて爆轟し得るものは一般に爆薬又は二次爆薬と稱せられピクリン酸、テトリール、トリニトロトルオール等之に屬し單なる着火にては爆轟せず、之を爆轟せしむるには起爆を必要とし此の爲起爆薬を金屬管に封入せる雷管を使用す、又通常の發射薬即ち狹義の火薬も此の方法に依り爆薬と同様<sup>3)</sup>に爆轟し得、本研究に於ては爆薬の爆轟速度を取扱ひ通常爆轟速度を爆速と略稱す。

## II 爆速の理論

火薬類の爆轟の理論的研究は氣體爆轟の理論的研究と密接に關連して發展し後者は前者の重要な基礎をなせり、火薬類の爆轟の理論的研究は E. Jouguet<sup>4)</sup>に其の基礎を發し R. Becker<sup>5)</sup>は詳細に爆轟波を研究せり、又 E. Bolle<sup>6)</sup>は此等の結果を記述解説せり、W. Jost<sup>7)</sup>及 B. Lewis 及 G. V. Elbe<sup>8)</sup>は氣體の爆轟の新舊の研究を系統的に記述解説し其の際火薬類の爆轟に言及せり、山家信次博士は氣體及火薬類の爆轟の理論及實用的方面に關し詳細にして系統的なる解説<sup>9)</sup>を行へり。

### (1) 爆速の實驗的研究

#### 1. 従來の爆速式

##### イ) Jouguet

氏<sup>10)</sup>は氣體の熱力學的水力學の爆轟理論の基礎式たる Riemann 式と Hugoniot 式に、Abel-Noble 状態方程式を併用して若干の略近を行ひ固體火薬類の爆速式を算出せり、其の爆速式次の如し。

$$D = \sqrt{2(k+1)} \frac{\sqrt{f}}{1-\alpha J}$$

但し

$$D = \text{爆速}, k = \frac{c_p}{c_v} = \text{比熱比}$$

$$f = \text{比エネルギー}, \alpha = \text{コポリウム}$$

$$J = \text{裝填密度}$$

##### ロ) R. Becker

氏<sup>11)</sup>は Jouguet と同様に Riemann 式と Hugoniot 式を基礎とし又 Amagat の窒素に對する實驗値に適合する氏獨有の状態式を省略化せる状態式を提出しその係數を適當に想定し火薬類の爆轟温度  $T_2$  を假定して爆速  $D$  及爆轟壓力  $P_2$  を算出する。

密度  $J = \frac{1}{v_1} = 2.65$  の置入に對して行ひたる計算の結果次の如し。

但し  $W$  は爆轟生成ガス流速なり。

$T_2$	$P_2$	$D$	$W$
2000 abs	56400 atm	3690 m/sec	585 m/sec
2500	70.00	4120	655
3000	84500	4510	706

實測  $D = 3900 \sim 4200$  m/sec

尙ニトログリセリンに對する計算結果次の如し。

$T_2$	$P_2$	$D$
2000 abs	92500 atm	7230 m/sec
2500	110500	7930

實測  $D = 7450$  m/sec

##### ハ) A. Schmidt

氏<sup>12)</sup>は Jouguet 及 R. Becker の研究結果たる關係式 ( $D = W + S$  但し  $S =$  爆轟生成ガス中の音速) を利用し Abel-Noble 状態方程式及爆轟生成ガス分析結果を利用して火薬類の爆速式を導き一方 W. Friederich の爆速と裝填密度の關係に關する實測値をこの爆速式に代入し逆に Abel-Noble 式のコポリウム  $\alpha$  を求め之が密度増加に従ひ減少する事を明にせり、又火薬類の爆轟機構を考察し爆轟波面に於ては爆轟生成ガス分子は熱運動の他に未分解層に對し流速  $W$  を有しこの流れのエネルギーと熱運動のエネルギーが未分解層の火薬分子を活性化せしむる事を述べたり、氏の使用せる爆速式は次の如し

$$D = \frac{1}{1-\alpha J} \frac{k+1}{k} \sqrt{k \frac{RT_2}{M}}$$

但し  $R =$  ガス常數,  $T_2 =$  爆轟温度

$M =$  爆轟生成ガス分子量

A. Schmidt の計算結果次の如し

薬種	装填密度 $J=\rho_1$ kg/L	爆轟生成 ガス密度 $\rho_2$ kg/L	爆速 (實測) m/sec	コポリ ウム $\alpha$ L/kg	爆轟 壓力 atm	爆轟 温度 abs	爆轟熱 Kcal/kg	爆轟生 成ガス 流速 m/sec	爆轟生 成ガス 平均分 子量
四硝酸ベンタ	0.5	0.69	3960	0.79	21300	5000	1530	1090	29.16
	0.65	0.87	4400	0.70	30800	"	"	"	"
	0.80	1.03	4900	0.64	42200	"	"	"	"
	1.00	1.25	5500	0.57	59200	"	"	"	"
	1.20	1.45	6300	0.52	81300	"	"	"	"
ニトリソット	1.40	1.65	7100	0.47	107000	"	"	"	"
	1.60	1.85	7100	0.44	136000	"	"	"	"
	1.0	1.29	5480	0.59	54600	4050	1010	1010	26.64
	1.28	1.52	6500	0.51	82600	4260	1885	1035	27.95
	1.45	1.68	7220	0.48	104000	4300	1085	1097	27.98
テトリール	1.54	1.78	7375	0.46	112000	4250	1145	999	29.30
	1.61	1.89	7470	0.44	119000	4230	1145	1000	29.95
	1.03	1.25	5150	0.58	48300	3600	850	923	23.57
	1.23	1.46	5820	0.53	65800	3720	912	924	29.64
	1.39	1.62	6450	0.49	82100	3800	950	928	30.40
ビクリン酸	1.63	1.87	7210	0.44	109000	4050	1014	940	31.95
	1.1	1.23	4700	0.58	41600	3350	910	897	28.96
	1.29	1.53	5900	0.52	67600	3530	1008	900	30.80
トリニトロ	1.46	1.70	6500	0.48	84000	3550	1017	896	31.33
	1.59	1.83	6900	0.45	96500	3630	1085	891	32.72

=) J. F. Roth

氏<sup>18)</sup>は A. Schmidt の爆速計算を實用化し分解方程式を熱的數値より計算し種々の爆薬に対して爆

速、爆轟壓力等を計算せり、爆速式は A. Schmidt 式と同一なり。

J. F. Roth の計算結果次の如し。

薬種	装填 密度 g/cm <sup>3</sup>	爆轟生 成ガス 密度 g/cm <sup>3</sup>	爆轟 温度 abs	爆轟熱 Kcal/kg	爆速 m/sec	爆轟生 成ガス 流速 m/sec	爆轟 壓力 atm	爆速 (實測) m/sec
四硝酸ベンタ	0.5	0.69	4400	1145.0	3850	1050	20000	3960
ニトリソット	1.60	1.85	4800	1444	8100	1080	138000	7100
トリニトロ	1.0	1.23	2780	723	4600	860	39000	4700
トルオール	1.59	1.82	2900	797	6720	865	91000	6900
ヘキサージェン	1.7	1.95	4810	1421	8900	1140	161000	8400
トリニトロト ルオール60% 硝酸安門40%	1.59	1.85	3000	859.2	7000	940	100000	6400 ~6800
過鹽素酸メ チルアミン	1.0	1.19	3500	1050	5000	955	—	3320
	1.22	1.5	"	"	5700	"	—	5030
	1.26	1.52	"	"	5850	"	63500	5500
	1.47	1.73	"	"	6750	"	87500	6300
	CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub> ·HClO <sub>4</sub>	1.57	1.83	"	"	7100	"	98000
	1.68	1.92	"	"	7400	"	120000	7540

\*) H. Langweiler

氏は Riemann 式 Hugoniot 式及 Abel-Noble 状態式を用ひ次の爆速式を導出せり。

$$D = \frac{1}{1-\alpha_d} (k+1)W$$

但し W=爆轟生成ガス流速

上式は結局は Jonguet の式と同一なり、氏は爆轟波面の後方に稀薄波面が進行することを論じこの間を爆轟波頭と稱しこの波頭は爆轟の進行に従ひその長さを長くする事に依り従來の Riemann, Hugoniot 式のエネルギー及運動量に関する難題を解決せんと試み此の考より爆速を數値計算にて求めるも爆速式の解析的表式は導出し居らず、トリエトトルオールに對する計算値次の如し、但しコボリウムは W. Friederich 氏の爆速測定値より A. Schmidt の推定せる値を用ひたり、又爆薬の裝填密度は 1.59 g/cm<sup>3</sup> とす。

	H. Langweiler	A. Schmidt
比熱比 k	1.175	1.16
爆轟生成ガス流速 W m/sec	855	891
コボリウム $\alpha$ l/kg	0.46	0.46
爆轟壓力 P <sub>0</sub> kg/cm <sup>2</sup>	9.55 × 10 <sup>4</sup>	9.65 × 10 <sup>4</sup>
爆轟生成ガス密度 $\rho_2$ kg/l	1.82	1.83
爆轟溫度 T °C	3107	3630

へ) W. Friederich

氏は火薬類の裝填密度と爆速の關係を實測し次の爆速式を提出せり。

$$D_1 = \frac{D(5d_1+1)}{6}$$

但し D<sub>1</sub>=最高裝填密度と裝填密度の比 d<sub>1</sub> に於ける爆速

D=最高爆速

氏は火薬類の燃焼も爆轟も同一法則に従ひガス分子の衝突に依り分解に必要なエネルギーが火薬類に與へられこの爲燃焼速度も爆轟速度もガス壓力又は密度に比例すと考へ氏の式は Muraour の火薬燃焼式  $V = \sqrt{P + a}$  (但し V=燃焼速度、P=ガス壓力、b 及 a は常數) の擴張と考へたり。

ト) G. Schweikert

氏は氏の砲内彈道學に於て導きたる特殊の状態方程式を用ひ又火薬燃焼速度式を爆轟に擴張して次の爆速式を提出せり。

$$D = \frac{a}{e'} \frac{+1 \frac{\varepsilon \rho}{L}}{1 + \frac{\alpha \tau_0}{L}} \cdot \frac{\bar{v}}{d}$$

但し v=平均分子速度成分

$\tau_0$ =分子の平均衝突持續時間

L=分子の平均自由行路、 $\rho$ =分子半徑

$\bar{v}$ =裝填密度、d=火薬の密度

e'=火薬分子を分解せしむるに必要な分子衝突數の 2 倍、 $1 \leq e' \leq 2$

チ) R. Schwob

氏は火薬類の結晶内の爆轟傳播速度 V<sub>1</sub> と結晶間の爆轟傳播速度 V<sub>2</sub> を考へ之より裝填密度と爆速の關係を導出せり。

$$D = \frac{1}{m-n} \frac{1}{D^{1/3}}$$

但し m 及 n は實測に依り決定され各火薬類に特有の常數なり、氏は W. Friederich の測定値より之を次の如く算出せり。

薬名	m	n
ピタリン酸	0.0006117	0.0004084
ニトロヘキサノール	0.0005638	0.0003744
テトリール	0.0005276	0.0003439
四硝酸ペンタエリトリット	0.0005106	0.0003290

リ) W. Taylor

氏は火薬類の爆轟の際の爆轟波の未分解層内に於ける壓力變化と層内の分解速度と壓力の損失率とを考慮に入れ次の爆速條件式を提出せり。

$$D = \frac{k}{\frac{dp}{dx} + L}$$

但し p=壓力、x=薬幹方向の距離

k=火薬層内の分解速度

L=機械的抵抗に依る壓力の降下率

然し數値計算は行ひ居らず。

ヌ) L. R. Carl

氏は火薬類の爆轟を音波に依る歪の結晶の結合を破壊する現象と考へ火薬類の裝填密度と爆速の關係を實測し次の爆速式が實驗に適合する事を述べたり。

$$D = (a+a')x + b$$

但し x =  $\frac{\text{裝填密度}}{\text{最高密度}}$

a=密度増加に従ひ薬幹内の音速が増加する割合を表はす常數。

$a'$  = 壓力により火薬分子が爆轟方向に推進せしめられる事に依り爆速が増加する割合を表はす定数。

氏は  $a+a'$  及  $b$  を爆速の實測に依り次の如く定めたり。

薬種	$a+a'$	$b$	最高密度
ピクリン酸 アンモン	71.82 m/sec	380 m/sec	1.71
ピクリン酸 グアニジン	65.38	735	1.70
テトラニート ロアニリン	62.93	2065	1.84
ピクリン酸	58.52	1815	1.76
トリニート トルエン	57.34	1365	1.65
テトリール	50.17	2635	1.72
80~20 雷汞 鹽素酸加里	45.40	940	4.00
90~10 雷汞 鹽素酸加里	37.34	1365	4.12
雷汞	31.91	1795	4.42

以上述べたる爆速理論中にその重要なものは Jouguet, Becker, Schmidt, Roth, Lautgweiler の熱力學的流體力學的理論にしてこの理論の基礎的妥當性は現在確立せるものと認むべきなるも固體火薬類に對する適用に於ては何れも半實驗的近似解法たるは己むを得ざる所なるも Becker を除いては何れも Abel-Noble 状態式即ち Van der Waals 式の省略式を用ひ分子剛性球の假定即ちコボリウムの概念を用ひたる爲理論の適用に大なる制限を受け爆速の實測値よりコボリウムが密度増加に従ひ減少する事を實驗的に確めこの結果を又反轉して計算に使用せんとする方法にして理論的には理想氣體として爆轟時の特徴数を算出し之に上記のコボリウムに依る因數を乗じて實爆速値を得んとする方法にしてこのコボリウム因數は決定的なる役目を演じ 2~3 の程度にしてしかも前記の如く爆速實測値より定められたるコボリウムを基礎とするを以て一應良好なる一致を得るものなり、從て裝填密度等の爆速の關係を概観せんとするにはこの方法は未だ満足ならず Becker は氏の狀態方程式を更に省略し計算爆速が實測値に近き事を二、三の火薬類に付確めたるも氏の狀態式は高温高壓ガスの分子力を考慮しコボリウムの概念を用ひざる點に於て一層合理的なるもその爆速計算は未だ十分系統的總括的ならず断片的なる爲火薬類の爆速に關しその一般原則を明にするには十分ならず、高温高壓に於ける満足なる狀態式の不

明なる現状に於ては嚴密なる理論的解法は不可能にして常に半實驗的理論式に満足せざるべからず、筆者は省略せざる Becker 状態式を用ひ且つその係數は高密度に於て一般に高壓力を示す傾向大なるを以てその係數を適當に推定したるものを用ひて熱力學的流體力學的理論に依り爆速の系統的に異なる一列の火薬類に付爆速その他を算出しその傾向を明にし次に反應動力學的考察を加へ實用上最も重要な裝填密度と爆速の關係を單體火薬類に對し簡單なる公式にて具へ之を基礎として更に復雜なる多成分系火薬類の爆速式を導出せんとせり、尙 W. Friederich, R. Schwob, L. R. Carl 式の理論的根據は物理化學的に定量及推定し得ざる概念及數値を含み G. Schweikert 式, W. Taylor 式亦同様なり。

## 2. 熱力學的考察

從來の多くの體験に依れば火薬類の爆轟は一旦爆轟を生起せしむれば以後は一定不變の爆速を以て進行す、即ち定常爆轟波が成立す、從て爆轟波面の前後に於ける爆轟生成ガス及未分解の火薬層に對し物質不滅の法則及運動量保存の法則を適用し次の Riemann 式を得<sup>(1)</sup>。

$$D = v_1 \sqrt{\frac{p_2 - p_1}{v_1 - v_2}} \quad (1)$$

$$W = (v_1 - v_2) \sqrt{\frac{p_2 - p_1}{v_1 - v_2}} \quad (2)$$

但し  $v_1$  = 火薬 1g の占むる容積

$v_2$  = 爆轟生成ガス 1g の占むる容積

$D$  = 爆速,  $W$  = 爆轟生成ガスの流速

$p_2$  = 爆轟壓力,  $p_1$  = 大氣壓力

次にエネルギー保存の法則より次<sup>(2)</sup>の Hugoniot 式を得。

$$E_2 - E_1 = \frac{1}{2}(p_2 + p_1)(v_1 - v_2) + Q \quad (3)$$

但し  $E_1$  = 火薬 1g のエネルギー

$E_2$  = 爆轟生成ガス 1g のエネルギー

$Q$  = 火薬 1g の恒容爆發熱中爆轟波面に於て遊離さるゝ熱量

又爆速安定の條件より式を得<sup>(3)</sup>

$$\frac{\partial D}{\partial v_2} = 0 \quad (4)$$

次に爆轟生成ガスの狀態方程式を必要とするも高壓高密度なる爲氣體の爆發理論に於けるが如く理想氣體の狀態方程式は之を使用し得ず、又高密度なる爲分子の剛性球的模型即ちコボリウムを用ひる Abel-Noble 式の使用も不合理なり、從來は Abel-Noble 式を用ひて實測爆速値に合ふが如くコボリウ

を決定し火薬類の爆轟壓力等の特徴数が計算されたるも逆に装填密度の變化に依り爆速が如何に變化するかを解釋する爲にはこの方法は不適當なる事は勿論なり、依て高密度分子の引力及反撥力を考慮して導かれたる状態方程式を使用して装填密度と爆速との關係を考察する要あるを認む、筆者は次の R. Becker 型<sup>2)</sup>の状態方程式を使用せり。

$$P = RT \frac{1}{v} \left( 1 + \frac{k}{v} \frac{k}{e^{v_2}} \right) - \frac{\alpha}{v^2} + \frac{K}{v^3} \quad (5)$$

平均分子量  $M=27$  の氣體に對しては各係数の値次の如し。

$$D = \sqrt{\frac{R \left( 1 + \frac{k}{v_2} \frac{k}{e^{v_2}} \right) \left( Q_0 + E_1 + \frac{\alpha}{v_2} - \frac{K}{6v_2^3} \right) - C_1 \left( \frac{\alpha}{v_2} - \frac{K}{v_2^3} \right)}{C_1 (v_1 - v_2) v_2 - \frac{1}{2} R (v_1 - v_2)^2 \left( 1 + \frac{k}{v_2} \frac{k}{e^{v_2}} \right)}} \quad (8)$$

$$\text{上式と } \frac{\partial D}{\partial m_2} = 0$$

の二式より  $D$  を得

又  $P_2$  は次の如し。

$$P_2 = \left( \frac{D}{v_1} \right)^2 (v_1 - v_2) \quad (9)$$

$T_2$  は次の如し。

$$T_2 = \frac{\left( \frac{D}{v_1} \right)^2 (v_1 - v_2) v_2 + \frac{\alpha}{v_2} - \frac{K}{v_2^3}}{R \left( 1 + \frac{k}{v_2} \frac{k}{e^{v_2}} \right)} \quad (10)$$

次に  $E_1 = 1.51 \times 10^9$  erg/g

$C = 1.10 \times 10^7$  erg/g

$M = 27$

として爆發熱の大なる火薬類より順次に爆發熱小なる火薬類に對して特徴数を計算せんとす、尙爆轟生成ガスの比熱は温度上昇と共に増加するものと思ふべきも後の IV に於ける實驗的研究に於て明にせる如く爆轟の進行が甚だ迅速なる爲ガス分子の比熱は音波の分散に於けると同様に相當小なるものと考へられる。

イ級 爆發熱極めて大なる高密度火薬類

$Q = 1500$  cal/g

例 四硝酸ペンタエリトライト、ヘキソーゲン、ニトログリセリン、高濃素硝酸纖維素等

ロ級 爆發熱大なる高密度火薬類

$Q = 1000$  cal/g

例 テトリール、ピクリン酸、トリニトロトルオール等

$R = 9.07 \times 10^9$ ,  $k = 0.62$

$\alpha = 0.287 \times 10^9$ ,  $K = 0.576 \times 10^9$

上式は氣體 1g に對する式にして單位は dyne, cm, 絕對温度なり。

熱力學の第一及第二法則より。

$$E_2 = C_1 T_2 + \int_{v_2}^v \left[ T \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right) - P \right] dv \quad (6)$$

$$C_1 = k' + T \int_{v_2}^v \left( \frac{\partial P}{\partial T^2} \right) dv \quad (7)$$

但し  $C_1 =$  氣體の恒容比熱、又  $P_2 > P_1$

以上の各式を用ひて次式の如く爆速式を得。

ハ級 爆發熱小なる低密度火薬類

$Q = 600$  cal/g

例 デニトロフェノール、デニトロトルオール等

ニ級 爆發熱極めて小なる火薬類

$Q = 300$  cal/g

例 硝酸グアニデン、過鹽素酸アンモン、硝酸アンモン等

但し  $Q_0 = Q_2$  とす、圖 1 及表 1 に記したる値は大略の傾向を示すに過ぎざるも爆速  $D$  は火薬類の装填密度  $m_2 = J$  の増加に従ひ略直線的に増加する事を知る、即ち第一近似として  $D$  と  $J$  の關係は上記の理論的數値計算の結果より次の如し。

$$D = D_0 \frac{J + \alpha}{J_m + \alpha} \quad (11)$$

但し  $D_0 =$  最高爆速

$J_m =$  最大装填密度、 $\alpha =$  常數

尙装填密度の増加に従ひ爆速が増加するは爆轟生成ガス分子間に反撥力が作用する爲にしてこの作用なき、例へば理想氣體に於ては爆速は装填密度に無關係にして一定なり、氣體の爆速はこの後者の場合なり、(11) 式は爆速  $D$  を装填密度  $J$  の一次式として表はしたるものなるも前記の計算値に依れば更に正確には二次式として表はすべきものにして之を一次式として取扱ふ主なる理由次の如し。

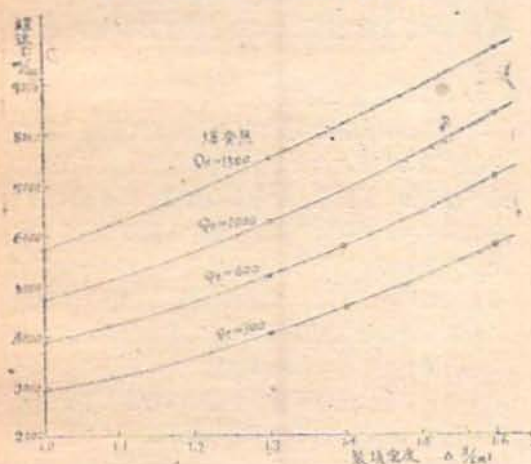
イ 前記の計算に用ひたる物理化學的數値は正確には不明のものにして大略の結果を示すに過ぎず、精細なる推論は目下の處不可能なり。

ロ 爆速測定値は相當の誤差を伴ひ余りに精密なる計算は意味を有せず。

表 1

	$Q_0$ cal/g	$\rho_1 = \frac{1}{r_1}$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_2 = \frac{1}{r_2}$ g/cm <sup>3</sup>	D m/sec	$T_2$ abs	$P_2$ atm	W m/sec
イ 級	1500	1.00	1.30	5750	6600	$77 \times 10^3$	1320
		1.30	1.60	7420	6600	135 "	1380
		1.60	1.90	9600	6480	234 "	1520
ロ 級	1000	1.00	1.30	4100	4420	53 "	1080
		1.30	1.60	6200	4360	94 "	1150
		1.60	1.90	8250	4300	173 "	1300
ハ 級	600	1.00	1.25	3880	2610	23 "	770
		1.30	1.60	5150	2740	65 "	960
		1.40	1.75	5700	2790	92 "	1140
ニ 級	300	1.00	1.25	2910	1420	17 "	580
		1.30	1.55	4080	1380	35 "	650
		1.40	1.65	4570	1340	45 "	690
		1.60	1.85	5730	1080	71 "	170

図 1 単體火薬類の装填密度と爆速



ハ 本研究の主眼とする二成分系火薬類の爆速式は単體火薬類の爆速式に二次式を用ふるも、一次式の場合と同様に導き得るも、徒に煩雑なる式となり実用上利益なし、又火薬類の猛度即ち全衝動量の式も同様にして徒に煩雑となり実用上利益なし。

### 3. 反応速度論的考察

2の熱力學的計算に於て爆發熱  $Q_0$  の大きさが 1500 cal/g, 1000 cal/g, 600 cal/g, 300 cal/g なる火薬類を想定して種々の特徴数を計算し爆速が装填密度増加に従ひ略直線的に増加する事を述べたるもこの四級の火薬類の分解に依り發生し得べき最大の爆發熱  $Q_0$  が果して爆轟波面に於て完全に遊離し得るや

即ち Hugoniot 式の  $Q_0$  にその火薬類の恒容爆發熱  $Q_0$  そのまゝを代入して可なりや否や (2 の計算に於ては  $Q_0 = Q_0$  として計算せり) は更に吟味を要す、即ち波面に於ける生成ガスの状態特にエネルギーが偶々條件 (爆發熱  $Q_0 =$  爆轟波面に於て遊離せらるる有効熱量  $Q_0$ ) を成立せしめ得るや否やは前述の 2 の熱力學的理論とは別に反應速度論的に考察するを要す、從て  $Q_0 = Q_0$  の時は前記 2 の考察結果は妥當なるも  $Q_0 > Q_0$  の場合はこの  $Q_0$  に依り實際の爆速は支配され又装填密度等の條件に依り  $Q_0$  が變化し得る場合は爆速に必ずしも 2 に導きたる關係を示さず、火薬類の爆轟に於て未分解層が如何なる機構に依り迅速に分解するやの問題は從來種々の方面より考察されたるも断熱壓縮に依る温度上昇にては説明し得ざる事は現在一般に認めらるる  $\Delta$  處<sup>20)</sup> にして H. Langweiler<sup>21)</sup> は爆轟生成物の熱輻射に依るものと考へたるも現在の處火薬類の燃焼と同様に爆轟生成物分子の衝突に依り活性化<sup>22)</sup> する  $\Delta$  のものと考ふるが最も妥當なり、爆轟生成ガスは火薬類の未分解層に衝突するもこのガス分子の有するエネルギーが火薬分子を分解するに必要な量即ち臨界エネルギー以上なる場合は  $Q_0 = Q_0$  の條件成立す、先に 2 に於て考察せるイ、ロ、ハ、ニ級の火薬類の爆轟温度と生成ガス平均分子量より爆轟方向の平均分子速度成分  $C_m$  m/sec を計算し得、又火薬類の常溫附近に於ける臨界エネルギーは略 30 K cal/mol<sup>23)</sup> なるを以て之より  $C_m = 3040$  m/sec 以上の速度を以

て衝突するガス分子は火薬類を分解し得る事を知る、尙本研究に於て火薬類の爆速の系統的研究を行ふにその爆發熱の位數を重視し之により系列を定めたるは第一に爆發熱の大なる事が火薬類の最も重要な物性<sup>20)</sup>なる事第二に本研究に於て論ずる火薬類は爆轟生成ガス分子數略同一にして活性化エネルギーは通常<sup>21)</sup>の非爆發性分子も火薬類も大差なき事<sup>22)</sup>の二點より考察し爆發熱の大小が火薬類の爆速に最も重大なる關係を有する爲なり。

$C_m$  の計算は理想氣體と假定して行へるも分子反撥力状態變化が漸熱なる條件を考慮すれば  $C_m$  は表 2 に示せるより更に大となる、又後に IV に示す如く  $W$  の實測値は表 2 の値より大にして従て實際の  $(C_m + W)$  は一般に表 2 に示せるより大なりと考へらる、表 2 は大略の傾向を示すものなり。

表 2

	$Q_0$	$C_m$	$W$	$C_m + W$
	cal/g	m/sec	m/sec	m/sec
イ 級	1500	1300	1820	2620
ロ 級	1000	1070	1680	2150
ハ 級	600	830	770	1600
ニ 級	300	610	580	1190

#### a. 装填密度と爆速

爆發熱極めて大なる火薬類に於ては生成ガス分子は未分解層を分解するに必要なエネルギー以上のエネルギーを以て衝突し來るを以て  $Q_0 = Q_0$  となり装填密度と爆速の關係は 2 の熱力學的理論に依り定めらる、更に爆發熱が小となるに従ひガス分子のエネルギー量は減少するも大部分は未分解層を分解するを以て  $Q_0$  は殆ど  $Q_0$  に近く、従て爆速も装填密度増加に従ひ略直線的に増加す。然し爆發熱極めて小なる火薬類に於ては生成ガス分子の有するエネルギーは未分解層を常に分解し得るには小に過ぎ  $Q_0$  は  $Q_0$  より遙かに小となり其の程度はガス分子の状態のみならず未分解層の反應表面の状態により大に左右さる、即ち純然たる爆轟よりむしろ燃焼に近き性質著しくなる、従て装填密度を増加する場合未分解層の表面積に變化なき範圍に於ては 2 の熱力學的理論の示す如く装填密度増加に従ひ爆速は増加するも更に装填密度を大とし火薬粒子が互に壓着され反應表面が減少するに至れば  $Q_0$  は有効なる反應表面の減少に従ひ著しく減少するを以て爆速は装填密度増加に従ひ減少するに至り遂には燃焼するのみにて爆轟し得ざる状態に至る、之れ即ち死壓の現象なり、但し此の死壓を示すが如き火薬類に於ては其の

密度小なる時も定常爆轟波は成立し得ず、減衰的爆轟をなすを以て定常状態を基礎とせる熱力學的爆速論は成立し得ず、其の理論的取扱は極めて困難なり。

#### b. 薬温と爆速

爆發熱大なるものに於ては生成ガス分子の有するエネルギーが未分解層を分解せしむるに十分なるエネルギーを有するを以て  $Q_0$  は未分解層の状態に依り變化せざるか又は殆ど變化せざるかなり、即ち薬温を變化せしめて未分解層のエネルギーを變化せしむるも  $Q_0$  は殆ど變化なく従て又爆速も殆ど變化せず之に反し爆發熱極めて小なるものに於ては燃焼に近きを以て薬温高き場合は未分解層の活性分子を増加せる爲エネルギー不十分の生成ガス分子の衝突に依りても未分解分子が分解し得る機會大となり  $Q_0$  は著しく増加す、従て又爆速も著しく増加す、尙薬温の變化に依る爆發熱の變化は熱力學的 Kirchhoff の法則<sup>23)</sup> に依り火薬類の比熱、生成ガスの比熱を用ひて計算し得るもその變化は爆發熱自身が極めて大なる爲之に比して殆ど無視し得る程度なり。

#### c. 容器の強度と爆速

2 の熱力學的理論に於て明かなる如く波面に於ては爆轟前より密度は大となり即ち壓縮を生じ又先に述べたる如く爆發熱大なるものに於ては波面に於ける生成ガス分子の未分解層に対する衝擊は直ちに火薬分子を分解せしむるに十分なるエネルギーを有するを以て  $Q_0 = Q_0$  にして爆速は薬粒が開放せる状態にあるも強大なる容器内にあるも變化なし、之に反し爆發熱小なるものに於ては其のガス分子の衝擊エネルギーが直に未分解層を分解せしむるに不十分なるを以て  $Q_0 < Q_0$  にして  $Q_0$  の大きさはガスの集中程度小なる爲に爆速も容器の強度小となるに従ひ減少す。

又爆發熱大なるものに於ては生成ガス分子の未分解層に対する衝擊エネルギーが分子を分解するに十分なる値を有するを以て火薬類の機械的性質は  $Q_0$  従て又爆速に影響せず、之に反し爆發熱小なるものに於てはその生成ガス分子の衝擊エネルギーは常に分子を分解するに十分ならず、従て粒子度小にして反應表面積大なる時は  $Q_0$  大となるも粒子度大となり、反應表面積小となれば  $Q_0$  小となり従て又爆速は小となる。

以上に論じたる如く爆發熱極めて大なるものは純然たる爆轟を生ずるに對し爆發熱甚だ小なる火薬類は



むしろ燃焼に近き性能を有し種々の點に於て爆發熱極大なるものと異る、其の境界は元より連続的なるも便宜上爆發熱極小にして定常爆轟波の生じ得ざるもの(=級)を第 II 型その他(I級, II級, III級)の爆發熱大にして定常爆轟波の成立し得る火薬類を第 I 型と稱せんとす。

## (2) 二成分系火薬類の爆速

### 1. 従來の研究

従來は二成分系火薬類の成分の性質と二成分系の爆速に關して定量的系統的論理的研究は見られず、一般に二成分系の場合も單體火薬類と同様に單一化合物の如くに取扱はるる事多し、即ち Jouguet は氏の爆速理論に依り爆速式を導出し Taffanel 及 Dautriche<sup>(1)</sup> は混合爆薬たるダイナマイト No. 1 に此の式を適用せり。

又 J. Roth<sup>(2)</sup> は種々の炭磺用混合爆薬に對し單體爆薬に對する氏の簡易計算法を其の儘適用し爆速を算出し多くの場合は實測と合ふも KCl を數 10% ガス中に含む場合實測と合はざることを述べたり、又液體二成分系たるニトロベンゼン、テトラニトロメタン混合物に上記の方法を適用し<sup>(3)</sup> 銅柱壓縮量にて表せる實測強度と計算せる爆轟壓力が良く比例する事を述べたり。

A. Schmidt<sup>(4)</sup> は結晶に水分 20% を加へたるものが乾燥結晶より爆速大なる事實を氏の單體爆薬の爆速計算式に於けるコポリウムの影響により説明し又パラフィンと混合して鈍化せる雷汞が純粹の雷汞より大なる爆速を有する事實及パラフィンを混合せるトリニトロトルオールが純粹のトリニトロトルオールより大なる爆速を示す事實を同様にして説明せり、氏は又同一の論文に於て上記の考察と矛盾するも次の點を述べたり、即ちダイナマイト No. 1 の如く爆發性成分たるニトログリセリンとニトロセルローズと非爆發性成分たる木粉の混合物に於ては前二者は急速に自發的に分解し、後者の分解は緩慢なる爲木粉の燃焼は爆轟波面の通過後其の背後に於て初めて生じ従て木粉は爆轟に何等影響せずと論じ先の Dautriche の計算を不適當と述べ又トルオール、テトラニトロメタンの如き液體混合物に於ては單體爆薬類と同一の熱力學的取扱ひを行ひ得るも炭磺用不均一混合爆薬に於ては最早單體爆薬類と同一の取扱ひは行ひ得ず、可燃性混合物は氣體膨脹の壓力維持には役立つも爆轟壓力従て爆速に對しては逆に損失を與ふることを述べたり。

A. Majrich<sup>(5)</sup> 及 F. Storm は四硝酸ペンタニトリットとアルミニウム粉の種々の混合比の混合爆薬の威力を研究し鉛錘試験成績はアルミニウム粉の混合に依り増加するも猛度試験成績及爆速はアルミニウム粉の混合に依り減少することを實証し之は先づ四硝酸ペンタニトリットのみが瞬時に分解し猛度及爆速は之により決定されアルミニウム粉は氣體膨脹の際の爆生成物たる  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  等の酸素を含める氣體と二次的に反應するものにしてアルミニウム粉の存在は爆速に對しては損失となることを述べたり。

T. Urbanski<sup>(6)</sup> 及 T. Galas はヘキサソーゲン、四硝酸ペンタニトリット等と非爆發性液體グリセリン、アセトン、イソアミルアルコール等の混合物の装填密度  $\rho$  を一定して液體の混合率  $\gamma$  % を變化して爆速を測定し 10~30% に於て爆速に極大値が存在することを實驗し液體の存在なきものとせる場合の計算爆速を  $V_r$  とし混合物の爆速を  $V_m$  とし液體中の音波速度を  $C$  とすれば爆速の極大なる點に於ては近似的に

$$V_m - V_r = C$$

なる關係式が成立する事を述べ之は Becker 及 Schmidt の熱力學的理論と一致するものと考へたり。

以上述べたる従來の諸説を考察するに非爆發性成分を含む多成分系火薬類の爆速を純然たる單體火薬類と理論上同一に取扱はんとする Taffanel, Dautriche, Jouguet, Roth, Schmidt 等の方法は不合理なり、火薬類分子の爆轟は極めて迅速に進行するに反し非爆發性成分の分解は緩慢にして爆轟波面に於て後者と前者が同一程度に爆轟に奇異し得ざる事は理論上明にして幾多の實驗結果も之を證明す Schmidt の後期の考察及 Majrich, Storm の考察は此の方向に一步進み混合せられたる非爆發性成分はそれが高發熱體たる場合と雖も爆轟の進行に損失を與へ、爆轟完了後のガス膨脹期に初めて反應に參與するものと認むるに至りたり、即ち氏等の考察は混合せられたる非爆發性成分は爆速を専ら減少せしむる作用ありと考察せるも其の混合物の物理化學的性質及混合率等が定量的に爆速に如何に關係するやは全く論ぜらるゝに至らずして終れり、之に反し Urbanski, Galas の考察は混合せられたる非爆發性液體内の音速に相當する速度がむしろ爆發性成分のみの爆速に加はり従て非爆發性成分の混合に依り爆速は減少せず逆に増加し得る事を考察せるも混合率と爆速の關係

は定量的に明にするを得ず。

以上の如く従来の考察は混合せられたる非爆發性成分の物理化學的性質及混合率と爆速の關係に對し定量的結論又は公式を興へざるのみならず定性的推論をも可能ならしめず其の考察の理論的基礎も極めて不確實なり、從て種々の目的を以て非爆發性成分（高發熱體、鈍感劑、粘結劑等）を混合し多成分系火薬類を計畫せんとする際の爆速計算公式を得るには役立たず、筆者は先に述べたる單體火薬類の爆速理論を基礎として混合物の爆速に對する影響を理論的に考察し系統的實驗に依り其の考察を檢對せんとせり。

## 2. 二成分系火薬類の爆速式

二成分系火薬類としては大別して次の二種を考へ得。

1. 爆發性成分と非爆發性成分  
 2. 爆發性成分と爆發性成分

以下に於ては1の場合に付考察す、1の場合之を單一化合物の如く取扱ふ事は理論上も不可にして經驗上も妥當ならず。

爆轟波が藥粒の分子層を通過するに要するに要する時間は  $10^{-12} \sim 10^{-13}$  sec 附近にして分子の振動周期に近き為爆轟波面の通過の同時には爆發性成分のみ急速に分解し混合せられたる非爆發性成分は此の際未だ反應に參與せず爆發性成分の第一次的分解に依り生じたる生成ガスの膨張の段階に於て非爆發性成分は第二次的に生成ガスと反應す、即ち單體火薬に於けるが如き單一なる分解方程式は成立せず少くとも二段に分解す、即ち以上の二成分間に於てはエネルギー交換及エネルギー平衡の餘裕なき内に爆轟波は通過するを以てエネルギー交換及平衡に依り支配されるが如き物理化學的性質例へば非爆發性成分の比熱、化學的反應性、發熱量、熱傳導率、解離熱等は爆速に直接は影響せず少くとも第二次的影響を有するのみなり、之に反し混合せられたる非爆發性成分の空間占有容積即ち密度は爆速に對し根本的な影響を有す。

先に(1)に於て單體火薬類の爆速は其の裝填密度に影響さるゝ事甚だ大なる事を述べたるも二成分系火薬類に於ける事情も根本的には同一なり、即ち他の條件一定の場合二成分系の爆速は爆發性成分の裝填密度に依り其の大體を定めらるゝと考ふるを至當とす。

即ち非爆發性混合物に依り爆發性成分の裝填密度は變化す、二成分系火薬類は此の裝填密度に對す

る單體火薬類としての爆速にて爆轟す。

以上の考察を定量的に表せば次の如し。

(11) より

$$D_j = D_m \frac{d+a}{d+m a} \quad (12)$$

但し  $D_j$  = 二成分系火薬類の爆速 m/sec,

$D_m$  = 爆發性成分の最大爆速 m/sec,

$\Delta_m$  = 爆發性成分の最大密度 g/cm<sup>3</sup>,

$a$  = 常數 g/sm<sup>2</sup>,

$\Delta$  = 爆發性成分の裝填密度 g/sm<sup>2</sup>

今  $\Delta_j$  = 二成分系の裝填密度 g/cm<sup>3</sup>,

$W_1$  = 二成分系火薬類 1 cm<sup>3</sup> 中の爆發性成分の g,

$W_2$  = 二成分系火薬類 1 cm<sup>3</sup> 中の非爆發性成分の g,

$d_m$  = 非爆發性成分の眞比重 g/cm<sup>3</sup>,

$x$  = 非爆發性成分の重量百分率,

$y$  = 爆發性成分の重量百分率

とすれば

$$W_2 = \frac{x \Delta_j}{100} \quad (13)$$

$$W_1 = y \frac{\Delta_j}{100} = \left(1 - \frac{x}{100}\right) \Delta_j \quad (14)$$

又二成分系に於ける爆發成分の裝填密度  $\Delta$  は次の如し。

$$\Delta = \frac{W_1}{1 - \frac{W_2}{d_m}} \quad (15)$$

(13), (14), (15) を (12) に代入して

$$D_j = \frac{D_m}{\Delta_m + a} \left( \frac{W_1}{1 - \frac{W_2}{d_m}} + a \right)$$

$$D_j = \frac{D_m}{\Delta_m + a} \left\{ \frac{(100-x)\Delta d_m}{100 d_m - x \Delta_j} + a \right\} \quad (16)$$

以上は二成分系火薬類に付て考察せるも二種以上の非爆發性成分を含有する多成分系火薬類に對して上式を擴張することは容易なり。即ち  $(n+1)$  成分系に對し

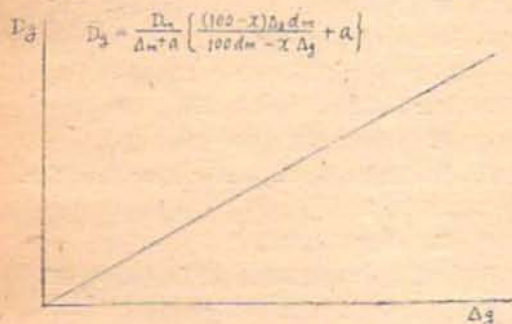
$$D_{j,n} = \frac{D_m}{\Delta_m + a} \left\{ \frac{\left(100 - \sum_{i=1}^n x_i\right) \Delta_j \sum_{i=1}^n x_i d_{i,n}}{100 \sum_{i=1}^n x_i d_{i,n} - \Delta_j \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)} + a \right\}$$

## 3. 裝填密度と爆速

(16) 式に於て二成分系の裝填密度  $\Delta_j$  と爆速  $D_j$

の関係を考察するに  $\Delta_g$  の増加に従ひ (16) 式の分子は増加し又  $\Delta_g$  の増加に従ひ分母は小となるを以て  $\Delta_g$  の増加に従ひ  $D_g$  は増加す、数値計算を行へば此の關係は殆ど直線的にして圖 2 の如き關係を示す。

圖 2. 二成分系火薬類の裝填密度  $\Delta_g$  と爆速  $D_g$



4. 混合率と爆速

二成分系の混合率と爆速の關係は次の如く二つの場合に分けて考察し得

- イ、鑄造又は空隙なき場合
- ロ、混合爆薬類

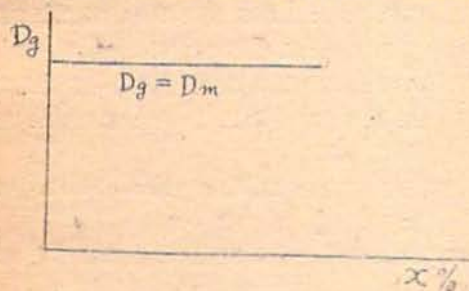
イ、鑄造又は空隙なき場合

鑄造又は空隙なき場合の二成分系に於ては爆發性成分の實裝填密度は非爆發性成分の混合率如何に拘はらず一定にして而も最大密度なり、従て次式が成立す。

$$D_g = D_m$$

即ち圖 3 の如し

圖 3 二成分系鑄造火薬類の混合率  $x\%$  と薬速  $D_g$



ロ、混合爆薬類

此の場合は通常空隙を有する爲混合率と爆速との關係は鑄造又は空隙なき場合に比し稍複雑となるも先に導きたる (16) 式を非爆發性成分の混合率  $x$  と爆速  $D_g$  の關係を明にする爲次の如く變形す。

$$D_g = \frac{D_m}{\Delta_m + a} \left\{ (d_m + a) + \frac{100 d_m (\Delta_g - d_m)}{100 d_m - x \Delta_g} \right\} \quad (18)$$

従て次の三つの場合を生ず。

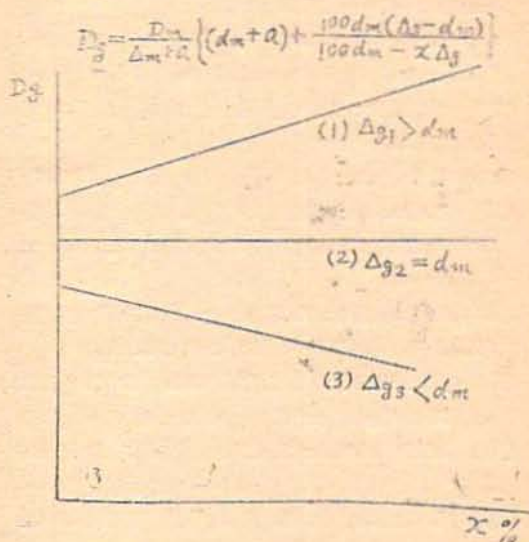
(1)  $\Delta_g > d_m$  即ち二成分系の密度が非爆發性成分の眞比重より大なる場合、此の場合は非爆發性成分の増加に従ひ (18) 式第二項の分子小となり  $D_g$  は増加す。

(2)  $\Delta_g = d_m$  即ち二成分系の密度が非爆發性成分の眞比重と等しき場合は (18) 式の第二項零となり常數項のみ残る、即ち爆速は非爆發性成分の混合率  $x$  に關係せず一定なり。

(3)  $\Delta_g < d_m$  即ち二成分系の密度が非爆發性成分の眞比重より小なる場合、此の場合 (18) 式の第二項は負となるを以て非爆發性成分の混合率  $x$  の大となるに従ひ  $D_g$  は減少す。

以上三つの場合を圖示すれば圖 4 の如し。

圖 4 二成分系混合爆薬類の混合率  $x\%$  と爆速  $D_g$



以上の二成分系火薬類の爆速の理論的考察に於て混合せられたる非爆發性物質の爆速に對する第一次的影響たる空間占有に依る爆發性成分の實裝填密度の變化を基本的因子として爆速式を導きたるも非爆發性成分増加に従ひ上記の第一次的空間占有効果以外に爆轟波面に於ける未分解層の迅速なる分解に對する影響も生ず、即ち生成ガス分子が未分解層に衝擊を與ふる際混合物は此のガス分子の進路を妨害

し二次的遮断効果を示し此の効果は爆速を前記の理論式の示す値より低下せしむる方向に作用し其の低

下率は非爆発性成分の混合率の増加に従ひ大となる。(續く)

文 献

- (1) N. Yamaga: Proceedings of the World Engineering Congress, Tokyo 31. (1929) 79; Z. S. S. 25 (1930) 69
- (2) 新美政義: 火薬類の感度及起爆機構に関する研究; 火兵學會誌 32 (昭和14年) 396; General Discussion, Trans. Faraday Soc. 34 (1938)
- (3) Urbanski: Z. S. S. 34 (1939) 103
- (4) E. Jouguet: Mecanique des explosifs (1917)
- (5) R. Becker: Z. Physik 8 (1922) 321, Z. Elektrochem. 42 (1936) 457.
- (6) E. Bolle: Handbuch der Physikalischen und technischen Mechanik VI, (1927)
- (7) W. Jost: Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen (1939) 157
- (8) B. Lewis and G. v. Elbe: Combustion, Flames and Explosions of Gases (1938)
- (9) 山家信次: 爆発論講義; 火兵學會誌 28 (昭和10年) 303
- (10) E. Jouguet: Mecanique des explosifs (1917)
- (11) R. Becker: 前田 (5) 及 Z. Phys. 8 (1922) 359, Z. Elektrochem. 23 (1917) 40, Z. Phys. 4 (1921) 393
- (12) A. Schmidt: Z. S. S. 自 30 (1935) 至 31 (1936) 8, 37, 80, 114, 183, 218, 248, 284
- (13) J. F. Roth: Z. S. S. 35 (1940) 193, 220, 243
- (14) H. Langweiler: Z. Tech. Phy. 19 (1938) 271
- (15) W. Friederich: Z. S. S. 28 (1933) 2, 51, 80, 113
- (16) G. Schweikert Z. S. S. 29 (1934) 49 G. Schweikert: Innere Ballistik, (1932)
- (17) R. Schwob: Compt. Rendus 193 (1934) 1990
- (18) W. Taylor: Trans. Faraday Soc 34 (1938)
- (19) L. L. Carl: J. Franklin Institute 230 (1940) 75, 207, 354
- (20) E. Bolle 前田 (6)
- (21) 同上
- (22) 同上  
E. Jouguet: 前田 (4) 370  
H. Langweiler: 前田 (14)  
Scorah: J. Chem. Phys. 3 (1935) 425
- (23) R. Becker: 前田 (11)
- (24) W. Taylor 及 A. Weale: Proc Roy. Soc. 138 (1932) 92
- (25) H. Langweiler-前田 (14)
- (26) 山家信次: 火兵學會誌 23 (昭和4年) 427  
H. Muraour: Z. S. S. 1 (1935) 1  
A. Schmidt: Z. S. S. 10 (1936) 324, Z. S. S. 5 (1938) 121  
R. Becker: Z. für Physik 8 (1922) 360  
General Discussion, Trans. Faraday Soc. 34 (1938)
- (27) 新美政義: 前田 (2)
- (28) 山家信次: 前田 (26)  
H. Brunwig: Explosivstoffe (1923) (Handbuch der angewandten Physikalischen Chemie)
- (29) 新美政義: 前田 (2)
- (30) J. R. Partington: Chemical Thermodynamics (1924) 29
- (31) E. Jouguet: Mecanique des Explosifs (1917) 374
- (32) J. F. Roth: Z. S. S. 35 (1940) 193, 220, 243
- (33) J. F. Roth: Z. S. S. 36 (1941) 4, 28, 52
- (34) A. Schmidt Z. S. S. 30 (1935)~31 (1936)
- (35) A. Majrich und F. Storm: Z. S. S. 30 (1935) 295, 337  
阿氏の考察は既に H. Kast がアルミニウム粉入爆薬に對し考察せる所と同一なり  
H. Kast: Spreng- und Zündstoffe (1921) 31, 379  
H. Kast, Z. S. S. 5 (1901) 251
- (36) T. Urbanski et T. Galas: Compt rend. 209 (1939) 553, 560