

報 文

衝撃波によるメタンガスの点火に関する考察

第三報 爆発衝撃波による CH_4 -Air の点火に関する理論的研究

(昭和25年11月28日受理)

村 田 勉

(日本油脂株式会社武豊工場)

摘 要

爆発の爆発によって生ずる衝撃波の速度や巾に関し研究して爆発のエネルギーと爆速に依つて定まる理論式を誘導した。それにより実用炭酸爆薬に就き数値計算を施して CH_4 -air の引火試験成績と比較するに計算値が実験値とよく合致する。仍て食塩や海藻の如き充分の消焰剤を含む炭酸爆薬が CH_4 -air に点火するのは衝撃波によると考えられる。又坑道壁からの反射波が集中衝突する場合は高圧と高エネルギー密度になるから CH_4 -air の点火源となり得る。

CH_4 -air の混合気体中に炭酸爆薬を懸吊して爆発せしめる場合、爆薬の極く近くでは爆発衝撃波が点火の条件を満たし、局部的に CH_4 分子の分解が始まっても CH_4 -air の燃焼爆発の速度が充分高速に達しない間に、衝撃波に内接して進んで来る不燃性ガスに追いつかれ攪乱されて吹消される。従つて衝撃波による CH_4 -air の点火は衝撃波が爆発生成ガスから分離した後は弱くなつて点火の条件を満たさない場合は坑道壁による反射衝撃波が集中衝突する焦点で点火が起ると考へられる。

I 結 言

爆発生成物の高速運動とか、爆発エネルギーに依る急激な加熱とか固体の超音速飛行とかの現象は周囲の媒体に衝撃波を発生するのであるが、その衝撃波発生の根源は如何なるにもせよ、衝撃波によるメタン空気混合ガスの点火が起るためには一般的に衝撃波の速度と厚さ(幅の意味)とか如何なる関係にあるべきかに就て筆者は前報に述べた。今回は爆発の爆発によって生ずる衝撃波の性質を理論的に研究し、次でそれによる CH_4 -air の点火の問題を論ずることとする。

有限振幅の強い音波や衝撃波に関する理論的研究は往時の Poisson, Stokes, Earnshaw, Rankine, Riemann, Hugoniot, Vieille, Lord Rayleigh, Rüdenberg, Jouguet, Becker, Hadamard, Taylor 等の流体力学者、音響学者或は火薬学者により盛んに行われていた古典的時代を過ぎたが、第2次世界大戦終了後は再び多数の研究が発表され、衝撃波の研究は第2期の開花期の様相を呈している。

其の最近のものに就きわかれ火薬家の参考となる

ようなものを通覧するに、先づ Brinkley and Kirkwood¹⁾ は爆薬の爆発衝撃波の爆源附近のエネルギーや圧力傳播を論究しているが、衝撃波の幅に関しては言及していない。又強い衝撃波が固体壁で反射する場合に入射角が大なるときは Mach 反射を生じ衝撃三重点の生ずることは Polachek and Seeger²⁾ の報告する所であり、更に詳細な実験が Harrison and Bleakney³⁾ により行われている。気体中の衝撃波と液体中の水圧激昇の相似性を Gilmore, Plesset and Crossley⁴⁾ は論じている。又原子爆弾の爆発の場合の爆速や圧力を Caldirola⁵⁾ は計算し、更に Taylor⁶⁾ は其の爆発衝撃波の傳播の問題を研究し、その結果は1945年の New Mexico に於ける第一回原爆実験の値とよく一致している。斯くの如き超々高速の衝撃波の関係式の相対論的な研究は Taub⁷⁾ のなし違へたところである。普通の衝撃波の減衰の問題は Stoner and Bleakney⁸⁾ や Cassen and Stanton⁹⁾ が取扱つている。尚 Neumann and Richtmeyer¹⁰⁾ は水圧衝撃の数値計算法を示し、Bleakney and Taub¹¹⁾ は衝撃波の相互作用を論

じている。その他、Thomas¹³⁾は各種の条件下の衝撃波の問題を多数研究している。

日本に於ける衝撃波の研究で特に注目になるのは藤田¹⁴⁾と櫻井¹⁵⁾氏の報告である。前者は気体の二次粘性の導入により衝撃波の厚さが古典理論の示す如き値より大なるべきことを示し、後者は乱流理論を適用して混合長と Mach 数とから波の厚さの計算式を誘導している。

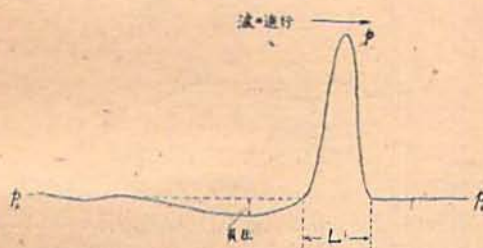
以上の諸研究は何れも衝撃波の力学的性質を研究したり或は破壊作用や抵抗を研究することを目的とするものであり、又衝撃波の厚さを論ずるのも媒体粒子が衝撃波頭で最高流速に達するまでの厚さの意味で、一つの衝撃波全体の幅を研究したものではない。

此処に筆者は爆薬の爆発衝撃波による $\text{CH}_4\text{-air}$ の点火の問題を研究するに当たり、波（正確には Pulse の意味）の全体としての加圧時間と圧力とが決定的要素であるとの見解を取るが故に、波の加圧側の長さを幅と称して、その爆発エネルギーとの関係を先づ誘導し、次にそれによる $\text{CH}_4\text{-air}$ の点火の問題を考察したいと思う。

II 爆薬の爆発によつて発生する衝撃波の理論

空気中に爆薬が爆発する場合発生する衝撃波は図1の如き形のものである。

図1 爆発衝撃波の形

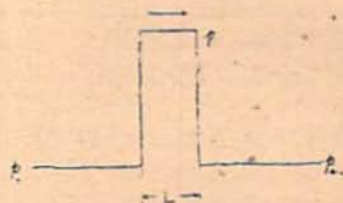


即ち静止圧力 p_0 の気体中に急激なる圧力上昇があり、それに続いて比較的緩慢な負圧力の時間がある。負圧の期間は常に加圧の期間より長い。加圧の部分は完全なる正弦曲線ではないが、これを調和分析して Fourier 級数に展開することは可能である。即ち振幅と位相を異にする多くの正弦曲線の代数和として表わされ得る。筆者は此の調和分析を行つた経験があるが、それを一々行うことはその波形一つの研究としては意味があるけれども、衝撃波の傳播を問題とする場合には余りに煩雑となるばかりでその効果が少い。

さて衝撃波による $\text{CH}_4\text{-air}$ の点火の可能性を考察する際には前報でも明かしく加圧時間即ち加圧の幅が重要な因子である。仍て筆者は図1の加圧波の部分

に面積を一致せしめるような図2の如き衝撃波を仮定し、それが相似形を保つて傳播するとして其の波の幅 L を論ずることとする。此の場合には負圧は問題とならぬ。 $\text{CH}_4\text{-air}$ の点火に関しては要するに図1又は図2に示された加圧部分の面積が決定的要素であるから、数式上の簡略化のための図2の如き仮定は此の場合理論上の一般性を失わぬものと言える。

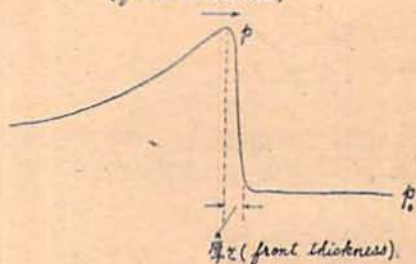
図2 仮想衝撃波の形



衝撃波の厚さに関する理論的研究は古くは Becker¹⁶⁾と Taylor¹⁷⁾とがあるがその厚さ (front thickness) とは図3に示す波頭の厚さの意味であつて、筆者が考案せんとする波の加圧時間を定めるための衝撃波の幅 [Width of shock pulse] とは異なるのである。

図3

3 普通の意味の衝撃波の厚さ (front thickness)



而して此の厚さは例えば Becker の古典理論によれば、気体分子の直径以下の極端に短いものとなる。それは理論上の不備な点があるからであつて、その点を Thomas¹⁸⁾が批判し、波の厚さがそんなに薄いのは物理的意味に欠け且つ実験的事実にも合致せぬことを指摘している。

筆者の言う衝撃波の幅とは上述の厚さよりずっと大きくなるべきことは本来の定義より明白であるが、此の幅と速度とを爆薬のエネルギーとの関連に於て研究されたものが未だ発表されておらない。此処に爆薬の爆発衝撃波に関し更に研究すべき必要がある。

今衝撃波の圧力を p 、密度を ρ とし、其の媒体の粒子速度を u とすれば、其の単位体積中のエネルギー E_1 は p が静止圧力 p_0 に比し大きいときは

$$E_1 = \frac{1}{2} \rho u^2 + \frac{p - p_0}{\gamma - 1} = \frac{1}{2} \rho u^2 + \frac{p}{\gamma - 1} \dots (1)$$

で与えられる。爆薬が爆発して衝撃波が球面波として傳播するとすれば、爆源から R の距離に到達したときの球面衝撃波の全エネルギーは

$$4\pi R^2 E_1 = E \dots (2)$$

となる。右辺の E は爆薬のエネルギーの中で衝撃波として傳達される量である。爆薬が爆発する場合は爆発生成物が高温高圧の状態でも高速で噴出し周囲の媒体を排除して膨張する。此の膨張ガスの周辺に於て媒体は急激に圧縮され、衝撃波が形成される。従つて爆発の始めのエネルギーの一部は媒体の排除に費され或は爆発生成ガス自身に保持され、他の部分が衝撃波のエネルギーとして傳達されるわけである。今爆薬全エネルギーの中で衝撃波として傳わる部分を ε とし、之を衝撃傳達係数と名付ける。此の係数 ε の値は水中爆発では Arons and Yennie や Brinkley and Kirkwood⁽¹⁹⁾ によれば略 0.5 に近い。

爆薬が理想的完爆をした場合の爆速を D_0 とし、その単位量の爆発エネルギーたる火薬力を f とする。実際に工業爆薬を薬包紙筒の筒爆発せしむるときは其の爆速は D_0 より小さいのが普通であるからそれを D とする。而して爆薬の量を w 、その見掛け比重を ρ_1 とし、球形爆薬とした場合の半径を R_0 とすれば

$$E = \varepsilon \frac{D}{D_0} \frac{f w}{\gamma_1 - 1} = 4\pi R_0^2 \left(\varepsilon \frac{D}{D_0} f \frac{\rho_1}{3(\gamma_1 - 1)} \right) R_0 \dots (3)$$

となる。但し γ_1 は爆発生成ガスの比熱比である。式 (1) (2) 及び (3) より次の関係式を得る。

$$L \left(\frac{1}{2} \rho u^2 + \frac{p}{\gamma - 1} \right) = \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \left(\frac{\varepsilon}{3(\gamma_1 - 1)} \cdot \frac{D}{D_0} f \rho_1 \right) R_0 \dots (4)$$

さて一般に衝撃波の速度を c 、其の媒体の静止音速を a とすれば次の如き Rankine-Hugoniot の関係式がある。

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{2a}{\gamma + 1} \cdot \frac{\left(\frac{c}{a}\right)^2 - 1}{\frac{c}{a}} \\ p &= p_0 \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \cdot \frac{\left(\frac{c}{a}\right)^2 + 1}{\left(\frac{c}{a}\right)^2 + 1} \\ p &= p_0 \left[\frac{2\gamma}{\gamma + 1} \left(\frac{c}{a}\right)^2 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right] \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

又 $a^2 = \gamma p_0 / \rho_0$ であるから (5) 式を (4) に代入すれば

$$L \cdot \frac{2\gamma p_0}{\gamma^2 - 1} \cdot \frac{2\left(\frac{c}{a}\right)^4 - 5\gamma^2 - 10\gamma + 1}{2\gamma(\gamma - 1)} \left(\frac{c}{a}\right)^2 + \frac{\gamma - 1}{\gamma} = \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \left(\frac{\varepsilon}{3(\gamma_1 - 1)} \cdot \frac{D}{D_0} f \rho_1 \right) R_0 \dots (6)$$

となる。尚 Mach 数 $M = c/a$ を用うれば此の式は

$$L \cdot \frac{2\gamma p_0}{\gamma^2 - 1} \cdot \frac{2M^4 - 5\gamma^2 - 10\gamma + 1}{2\gamma(\gamma - 1)} M^2 + \frac{\gamma - 1}{\gamma} = \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \left(\frac{\varepsilon}{3(\gamma_1 - 1)} \cdot \frac{D}{D_0} f \rho_1 \right) R_0 \dots (6)'$$

と書ける。(6) 式は爆薬が爆発した場合に爆源からの距離と衝撃波の速度及び幅との関係を与えるに必要な基礎式である。

次に Taylor⁽²¹⁾ によれば強い衝撃波の傳播速度は爆源からの距離の $\frac{1}{2}$ 乗に逆比例し、エネルギーの平方根に正比例するから

$$C = (B \rho_0)^{-\frac{1}{2}} R^{-\frac{1}{2}} \left(\varepsilon \frac{D}{D_0} \cdot \frac{f}{\gamma_1 - 1} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{4\pi g}{5.36 \rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\varepsilon}{3(\gamma_1 - 1)} \cdot \frac{D}{D_0} f \rho_1 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{\frac{3}{2}} \dots (7)$$

と置くことが出来る。(7) と (6) とから R を消去すれば

$$L \cdot \frac{2\gamma p_0}{\gamma^2 - 1} \cdot \frac{2\left(\frac{c}{a}\right)^4 - 5\gamma^2 - 10\gamma + 1}{2\gamma(\gamma - 1)} \left(\frac{c}{a}\right)^2 + \frac{\gamma - 1}{\gamma} = \frac{\left(\frac{\varepsilon}{3(\gamma_1 - 1)} \cdot \frac{D}{D_0} f \rho_1 \right)^{\frac{3}{2}} C^{\frac{3}{2}} R_0}{\left(\frac{4\pi g}{5.36 \rho_0} \right)^{\frac{3}{2}}} \dots (8)$$

となる。此の (8) 式から衝撃波の速度 C と幅 L との関係が計算され得る。衝撃波の速度を等しくしたときの衝撃波の幅は爆薬のエネルギーの 3 乗根に比例することがわかる。但しその場合の爆源からの距離は爆薬の種類によつて異なる。又 $\rho_1^{\frac{1}{3}} R_0$ は爆薬量の 3 乗根に比例するから衝撃波の幅は薬量の 3 乗根に比例することとなる。

III 爆発衝撃波の計算値と CH_4 -air への点火

炭礦爆薬の安全度試験法として試験坑道内に爆薬を懸吊して爆発せしめ、それにより周囲の CH_4 -air に点火するか否かを試験することがある。此の場合には爆発衝撃波により直接引火するか或は衝撃波が一旦坑道壁に衝突して反射し坑道内全面からの反射波が集中的に衝突して高い圧力を呈すると共に全体としての

波の幅も広くなるから引火し易くなることも考えられる。尚爆薬の種類によつては衝撃波によらず高温の爆発生成ガス（火焰）によつて引火するものもある。引火の主要因子は爆薬の性能と引火試験法の条件によつて異なるもので必ずしも一義的に決められないと考えられる。

さて或爆薬が爆発した場合の衝撃波の速度と幅との関係は前節に誘導した (8) 式で与えられる。

$$L \cdot \frac{2\gamma p_0}{\gamma^2 - 1} \cdot \frac{2\left(\frac{c}{a}\right)^4 - 5\gamma^2 - 10\gamma + 1\left(\frac{c}{a}\right)^2 + \frac{\gamma - 1}{\gamma}}{\left(\frac{c}{a}\right)^2 + \frac{2}{\gamma - 1}} = \frac{\left(\frac{\epsilon}{3(\gamma_1 - 1)}\right) \cdot \frac{D}{D_0} f p_1 C^{\frac{1}{2}} R_0}{\left(\frac{4\pi\epsilon}{5.36\rho_0}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

表 1 爆薬の組成と性能

薬 種	組 成									性 能			
	NG	NC	NH ₄ NO ₃	WM	Starch	DN ₂	TNT	NaCl	SW	p ₁	f	D	D ₀
A	-	-	73.0		3.2		8.0	15.8	-	1.0	6,530	4,000	4,440
B	8.0	0.3	63.7		8.0		-	20.0	-	0.9	6,200	2,190	3,000
C	8.0	0.3	71.2		-		-	-	20.5	0.93	7,700	2,110	3,300
D	8.0	0.3	69.7		-		-	7.0	15.0	0.93	6,800	1,820	2,800

(註) WM は木粉, SW は海藻。

之等の数値を用いて衝撃波の計算をする場合に問題となるのは衝撃波伝達係数 ϵ の値である。 ϵ は爆速が大なるときは大となるべきものであつて、鑄造 TNT の爆速 6,800 m/sec のものに就き水中爆発で 0.5 附近と言ふ値を用いて衝撃波の圧力上昇に比例するとすれば

$$\epsilon = 1.05 \times 10^{-5} \frac{2\rho_0}{\gamma - 1} (D^2 - a^2) \quad (9)$$

となる。此の ϵ は爆薬包が紙の如く抵抗のない場合であつて、爆薬容器の抵抗が大なるときはその破壊に若干のエネルギーが費されるから ϵ の値は小さくなる。前記薬種の ϵ の値は次の如くなる。

薬種	A	B	C	D
ϵ	0.172	0.051	0.047	0.035

之等の数値を用いて衝撃波の速度 C に対する幅 L を薬量 65 g に就き計算すれば表 2 の如くなる。各爆薬の C と L との関係は次の如くである。

A 爆薬:

$$L \times \frac{2\left(\frac{c}{a}\right)^4 + 3.4\left(\frac{c}{a}\right)^2 + 0.27}{\left(\frac{c}{a}\right)^2 + 5.53} = 2.024 \times 10^{-6} R_0 C^{\frac{1}{2}}$$

B 爆薬:

$$L \times \frac{2\left(\frac{c}{a}\right)^4 + 3.4\left(\frac{c}{a}\right)^2 + 0.27}{\left(\frac{c}{a}\right)^2 + 5.53} = 1.192 \times 10^{-6} R_0 C^{\frac{1}{2}}$$

此の式から任意爆薬を或量だけ 9% CH₄-air 中で懸吊爆発せしめた場合の衝撃波の速度 C と幅 L との関係を計算するに先づ普遍的常数として次の如き値を用いる。

$$p_0 = 1033 \text{ g/cm}^2$$

$$a = 340 \text{ m/sec}$$

$$\rho_0 = 1.22 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3 \quad 9\% \text{ CH}_4\text{-air の密度}$$

$$\gamma = 1.362 \quad 9\% \text{ CH}_4\text{-air の比熱比}$$

$$\gamma_1 = 1.30 \quad \text{爆発生成ガスの比熱比}$$

次に計算並に実験に使用する実用炭酸爆薬の組成と必要なる性能は表 1 の如きものである。

C 爆薬:

$$L \times \frac{2\left(\frac{c}{a}\right)^4 + 3.4\left(\frac{c}{a}\right)^2 + 0.27}{\left(\frac{c}{a}\right)^2 + 5.53} = 1.207 \times 10^{-6} R_0 C^{\frac{1}{2}}$$

D 爆薬:

$$L \times \frac{2\left(\frac{c}{a}\right)^4 + 3.4\left(\frac{c}{a}\right)^2 + 0.27}{\left(\frac{c}{a}\right)^2 + 5.53} = 1.056 \times 10^{-6} R_0 C^{\frac{1}{2}}$$

但し R_0 の値は爆薬の見掛比重によつて $R_0 = \left(\frac{3w}{4\pi\rho_1}\right)^{\frac{1}{2}}$ から算出して置く。

表 2 各薬種の衝撃波の巾 $\frac{2}{\pi}L$ (cm), C (m/sec)

C\薬種	A	B	C	D
1,000	1,184	0.721	0.724	0.633
1,200	0.972	0.592	0.594	0.520
1,400	0.832	0.506	0.508	0.445
1,600	0.733	0.446	0.448	0.392
1,800	0.661	0.402	0.404	0.353
2,000	0.602	0.367	0.368	0.322
2,200	0.556	0.339	0.340	0.297
2,400	0.518	0.315	0.317	0.277
2,600	0.486	0.296	0.297	0.260
2,800	0.459	0.280	0.281	0.245
3,000	0.436	0.256	0.267	0.233

本表で衝撃波の幅として $\frac{2}{\pi}L$ を採つたのは衝撃波を Fourier 級数に展開した場合の sine curve の平均圧力 p_{mean} に対する幅が L であるから筆者が第二報に報告した Peak pressure p_{max} に対する幅に換算したためである。

表2で薬量 65g に対する計算値を示したのは、例えば、試験坑道の直径 1.55m でも 1.20m でも爆薬 A の 65g が 9% CH_4 -air に点火しない最大薬量であるからである。A は 75g では殆んど常に引火する。爆薬 B, C, D は此の程度の薬量では引火しないのであるが、比較のため同一薬量に就き計算した。

さて式(8)で明かなように同一爆薬に於ては衝撃波の速度が等しいときは、その幅は薬量の3乗根に比例する。今表2の値から爆薬 B, C, D の衝撃波の幅が A の 65g と等しくなるときの薬量を求めれば夫々次の如くなる。

$$w_B = 65 \times \left(\frac{LA}{LB} \right)^3 = 288g$$

$$w_C = 65 \times \left(\frac{LA}{LC} \right)^3 = 285g$$

$$w_D = 65 \times \left(\frac{LA}{LD} \right)^3 = 425g$$

表 4 爆薬 A の衝撃波 (引火最小薬量)

C (m/s)	1,000	1,200	1,400	1,600	1,800	2,000	2,200	2,400	2,600	2,800	3,000
$\frac{\pi}{2}L$ (cm)	1.242	1.020	0.873	0.769	0.693	0.631	0.583	0.543	0.510	0.481	0.457

次に A の引火しない薬量 65g と引火する薬量 75g と同一衝撃波の条件を満たす B, C, D の薬量を表4に記す。

表 4 引火又は不引火の衝撃波条件を満たす薬量 (g)

薬種/条件	A	B	C	D
不引火 (A 65g)	65	288	285	425
引火 (A 75g)	75	333	329	491

表 5 試験坑道の引火試験成績 (引火回数/試験回数)

薬包結着法	薬量/薬種 g	65	75	112.5	225	338	450	563	675	788	900	1,013	1,125
直列	A	0/10	2/3	5/3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	-	-	0/3	0/7	0/7	2/7	1/3	1/1	-	-	-	-
	C	-	-	0/3	0/7	0/20	1/7	1/6	1/1	-	-	-	-
	D	-	-	-	-	0/1	0/7	0/1	0/7	0/1	0/7	0/10	1/1
並列	A	0/10	2/3	3/3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	0/3	3/3	-	-	-	-	-	-	-
	C	-	-	-	0/3	3/3	-	-	-	-	-	-	-
	D	-	-	-	-	-	0/1	0/1	1/1	-	-	-	-

此の実験値の中 A は直列も並列も一本の薬包であるから同一の試験成績を掲げてある。

即ち、爆薬 A の不引火最大薬量が 65g のときは爆薬包を並列に束にした場合の不引火最大薬量は B では 288g, C では 285g, D では 425g となる。B と C との差 3g 程度の少量は実験上は種々の条件の差異のため明確にすることは出来ないから B と C とは懸吊爆発に依る引火試験では全く同一安全度と見做され得る。

実際の引火試験に於て爆薬包を直列に縦ぎ足して爆発せしむるときは球形爆薬と考えた場合よりも爆轟波進行の時間的ずれのため衝撃波のエネルギー即ち幅が小さくなるから上記の計算値よりもずっと不引火最大薬量は増加するわけである。爆薬包を並列に団子状に結び付けて束束したものには引火薬量が減少し、筆者の球形爆薬としての理論式(8)から計算される薬量に近い筈である。尚 A は薬量 75g では引火するから、それと衝撃波の速度が同一の位置で同一の波の幅を与えるための B, C, D の薬量を計算すれば夫々 333g, 329g, 491g となる。

A の 75g のときの衝撃波の速度と幅 $\left(\frac{\pi}{2}L\right)$ は次の如くである。

此の四種の爆薬に就き試験坑道全長 23m にして直径 1.55m, 長さ 5m の爆発室の中で懸吊爆発による 9% CH_4 -air への引火試験を爆薬包直列と並列で行つた結果は次の如くである。薬包径 32mm のもので薬量の多い試験は 1 本重量 112.5g のものを何本も用いた。

表5の実験値で直列の場合は B, C は 338g まで引火しないが、並列では必ず引火する。又 D は直列

では 1,013 g まで引火しないが並列では 563 g まで引火しない。此の並列の場合の引火と不引火との境界の薬量は A, B, C に於ては表 4 の計算値と完全に一致し、D の場合は計算値より少く大きい。然し此の D は試験回数が多い引火、不引火の境界薬量は 450 g と 563 g との間に存在するかも知れない。さすれば表 4 の計算薬量に合致する。

斯くの如く衝撃波の速度と幅とが $\text{CH}_4\text{-air}$ の点火の決定的因子となす理論はよく炭酸塩による引火の実験値を説明することが出来る。今衝撃波による点火の機構を考えるに、爆薬が爆発して急激にガス化すれば高速のガス噴出と共に衝撃波が発生する。そして工業爆薬の場合此の噴出ガスそのものは大部分 CO_2 , H_2O , N_2 等で、それ自身は可燃性を有しない。爆薬の極く近くの所では衝撃波は非常に強く $\text{CH}_4\text{-air}$ への点火の条件を満たして局部的にメタン分子の酸化分解が始まっても $\text{CH}_4\text{-air}$ 自身のガス燃焼爆発の傳播速度が充分高速に達しない間に、衝撃波に内接して進んで来る不燃性噴出ガスのために追いつかれて攪乱され吹き消されてしまう。即ち局部的点火が起つても混合ガス全体に爆発は傳播しない。然し衝撃波の速度の減衰は噴出ガスの減衰より少く、やがて衝撃波は噴出膨脹ガスから分離して単独に先行する。此の分離した後でも尚衝撃波の速度と幅とが点火の条件を満たす程強力な爆薬ではその分離した衝撃波だけで点火し得ることになる。此の場合は試験坑道の径が極端に小さい限り不引火最大薬量は坑道径に無関係であつて爆薬 A がこれに該当する。又衝撃波が噴出膨脹ガスと分離した後弱くなつて点火の条件を満たし得ない場合はその衝撃波で直接点火は起らないが、それが坑道壁で反射して、反射衝撃波が集中衝突して引火することになるから坑道径により不引火最大薬量に変化する。爆薬 B, C, D はこれに属する。

反射衝撃波の速度や幅も始めに発生した衝撃波の速度と幅で定まるのであるから、(8) の理論式をその儘適用して不引火最大薬量の比較値の計算が出来るわけである。反射衝突の問題は次節に論ずる。

さて然らば単一衝撃波による 9% $\text{CH}_4\text{-air}$ への点火が如何なる速度の場合起るかにはメタンガスの燃焼の点火遅れを考慮した場合の前報に於ける点火条件式

$$L = \frac{c A e^{E/RT}}{P^n} \quad (9)$$

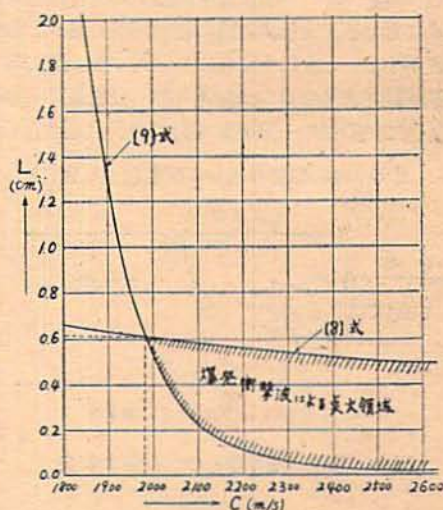
から計算される $c-L$ 関係と (8) 式からの $c-L$ 関係とから出て来る。但し (9) 式で $A = \frac{1}{7.33 \times 10^{-5}}$, $E = 28,600$, $n = 2.05$ である。即ち両式による計算値を掲示すれば表 6 並に図 4 の如くなる。

表 6 9% $\text{CH}_4\text{-air}$ 点火のための 衝撃波の速度と巾

衝撃波の速度 m/s	点火領域を決定する波の巾 (9) 式による cm	爆発衝撃波の巾 (8) 式による	
		不点火の場合 cm	点火の場合 cm
2,600	0.011	0.49	0.51
2,500	0.018	0.50	0.53
2,400	0.032	0.52	0.54
2,300	0.058	0.54	0.56
2,200	0.11	0.56	0.58
2,100	0.22	0.58	0.61
2,000	0.54	0.60	0.63
1,900	1.34	0.63	0.66
1,800	3.67	0.66	0.69
1,700	11.4	0.69	0.73
1,600	41.0	0.73	0.77

本表中 (8) 式による爆発衝撃波の幅として不点火の場合の最大値と点火の場合の最小値を併記してあるのは此の両者の中間が理論上の点火と不点火との境界値であるからであるが、爆薬による引火試験では其のような極めて微小な差異は実験誤差内に入るので分明しないから両者から推察するためである。然し実際には不点火の最大値を採るのが有意義である。

図 4 9% $\text{CH}_4\text{-Air}$ 点火のための爆発衝撃波の速度 (C) と巾 (L)



即ち両曲線の交点として $C = 1980$ m/s が得られ、そのときの $L = 0.61$ cm となる。即ち爆発衝撃波の速度が約 2,000 m/s 以上のとき点火することが理論的に明確になったわけである。此の場合の距離を計算すれば $R = 9.4$ cm となり、 $R_0 = 2.5$ cm であるから衝撃波は始めの薬径の約 4 倍の所で点火の条件を満たしていることになる。此の値は理論計算に用いた数値の正誤により

若干の動きを示すかも知れないが、衝撃波による CH_4 -air の点火と云う理論的取扱いの困難な問題に本研究は解決の端緒を与えたと信ずる。爆発衝撃波の速度が約 2,000 m/s 以上の時 CH_4 -air が点火され明確に detonation を起すべきことが純理論的に結論されたわけであるが、此のことは最近の Berets, Greene and Kistiakowsky の実験によつても証明されたことと認められるのである。

筆者の此の理論の実験的証明に用いた爆薬は相当その性能に差異のあるものではあるが、何れも消焰剤として多量の食塩又は海鹽を含有するものである。全然此の種の消焰剤を含まない黒ダイナマイトや桐ダイナマイトや葎ダイナマイトとかは懸吊爆発では常に 10 g や 15 g 程度の小薬量で CH_4 -air に点火する。それら少薬量の発する衝撃波は殆んど点火の条件を満たし難い。従つてそのような爆薬の点火機構は衝撃波によるのではなく、火焔が又は分解しつつ飛散する粒子によるのであろう。此のことから所謂消焰剤の作用は爆薬の爆発生成ガス(火焔)による直接点火を防止するもので、衝撃波による点火には全然関与しないと推論される。

IV 衝撃波の反射衝突による CH_4 -air への点火

試験坑道にて白砲発射なり懸吊爆発なりで炭酸爆薬による CH_4 -air への点火性を試験する場合坑道直径の大小により不引火最大薬量に相違が出て来る。即ち坑道径が小さいときは小薬量にて引火する。但し全く滅熱消焰剤を含まず且つ高爆速の非炭酸爆薬では殆んど坑道径に無関係の一定薬量で引火する。又黒色火薬

の如く燃焼するものは坑道径に無関係に小薬量で引火する。これは明らかに火焔で点火すると考えられる。此のように種類の異なる爆薬では引火の機構が違つてであろうと推定されるのである。

前者、即ち坑道径が異なる場合に不引火最大薬量の変化するものは図 5, 6 の如く衝撃波の反射波の集中衝突により引火すると考えるのが最も自然であろう。

図 5, 6 に於ける衝突点 P は立体的に考えれば点ではなく坑道内壁の光面からの反射波が集中的に衝突し或空間を占めるのである。而して此の空間内では衝撃波として傳達される全エネルギーが減衰した量を除いて、全部此処に集中するのであるから、非常に高エネルギー密度となる。そして圧力並に衝撃波の幅の和も大きくなるから当然 CH_4 -air への点火の能力を持つに至ると考えられる。此の点火能力は坑道径が小なる程大となるから坑道径小なるとき小薬量で引火し易くなる事実を説明し得る。

尚坑道径の影響としては衝撃波が坑道壁で反射する場合の Mach 反射の形成による衝突三重点のための点火も考えられないことはないが、坑道内壁の全円周に衝撃波のエネルギーが広がれ従つてエネルギー密度が薄くなっているから、反射波の圧力と上昇は数倍に達してもエネルギーが増加することはないし、前述の集中衝突の焦点効果程の高エネルギー密度にはなり得ないと思われる。但し坑道壁と爆薬との距離が近いときは Mach 反射による衝突三重点 (λ -configuration) は有力な原因となり得る。此の点に関しては尚機会があれば研究する積りである。

さて、衝撃波が図 7 に示す如く次第に接近して衝突する場合を単純化して理論的に取扱つて見よう。

図 5 白砲発射の場合の反射波の衝突

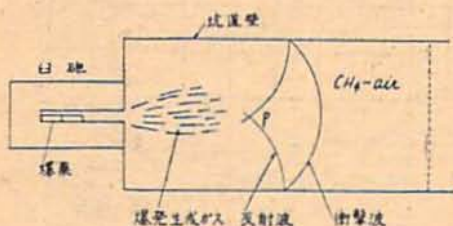


図 6 懸吊爆発の場合の反射波の衝突

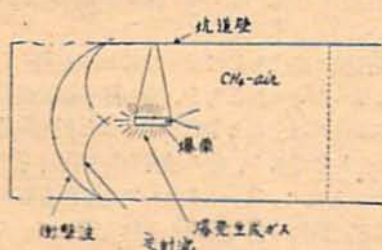
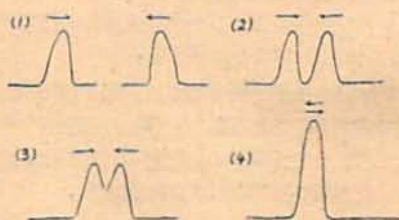


図 7 衝撃波の衝突過程



(1) の状態から近づいて (2) となり、(3) の状態では衝撃波の合計した幅が広くなり、(4) の状態では圧力が高くなる。図の二つの波が個別に単独に波及した場合に生ずべき変位を η_1, η_2 とすれば各の振幅が異なり(従つて圧力が異なり)遅期が同一であれば

$$\left. \begin{aligned} \eta_1 &= a_1 \cos \left(\frac{2\pi}{T} t + \phi_1 \right) \\ \eta_2 &= a_2 \cos \left(\frac{2\pi}{T} t + \phi_2 \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

であるから、或時刻 t に衝突して (4) の形になると

きの媒質の変位 η は

$$\eta = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1)} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \tan^{-1}\frac{a_1\sin\varphi_1 + a_2\sin\varphi_2}{a_1\cos\varphi_1 + a_2\cos\varphi_2}\right) \dots (11)$$

となり、其の瞬間には各の衝撃波の振幅より必ず大きい振幅となる。又週期は同一であり位相は異なる。若し $\varphi_1 = \varphi_2$ ならば振幅は $(a_1 + a_2)$ となり、二つの衝撃波の振幅の和に等しい。

次に振幅並に週期の異なる衝撃波の衝突を考えよう。但し位相は同一とする。

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_1 + \eta_2 = a_1\cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right) + a_2\cos\left(\frac{2\pi}{T_2}t + \varphi\right) \\ &= \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2\cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{T_2}t\right)} \cdot \cos\left(\tan^{-1}\frac{a_1\sin\frac{2\pi}{T}t + a_2\sin\frac{2\pi}{T_2}t}{a_1\cos\frac{2\pi}{T}t + a_2\cos\frac{2\pi}{T_2}t} + \varphi\right) \dots (12) \end{aligned}$$

であるから、やはり振幅は二つの衝撃波の振幅より大きくなる。又週期が等しければ、振幅は二つの振幅の和となる。

同様に同じ位置で第三の衝撃波がこれに衝突すれば、其の点の媒質の振幅は第三の波の振幅を加えたものになる。以下第四、第五の波が来れば位相の特別の場合を除き、振幅は逐次増大する。故に例えば断面円形の坑道壁全面から衝撃反射波が集中衝突する場合は其の焦点に於ける振幅即ち圧力は極端に高くなり、充分 $\text{CH}_4\text{-air}$ に点火し得るようになると考えられる。その場合の集中衝撃波の幅は前節の (8) 式から得られる幅に比例するから、一般的に炭炭爆薬の性能と点火性との関係の問題は (6) 又は (8) 式で決定され得る。

V 結 論

1. 爆薬の爆発球面衝撃波の傳播速度やその波の幅に関し理論的に研究して次の関係式を誘導した。

$$\begin{aligned} L \cdot \frac{2\gamma p_0}{\gamma^2 - 1} \cdot \frac{2\left(\frac{c}{a}\right)^4 - \frac{5\gamma^2 - 10\gamma + 1}{2\gamma(\gamma - 1)}\left(\frac{c}{a}\right)^2 + \frac{\gamma - 1}{\gamma}}{\left(\frac{c}{a}\right)^2 + \frac{2}{\gamma - 1}} \\ = \left(\frac{R_0}{R}\right)^2 \left(\frac{\varepsilon}{3(\gamma_1 - 1)} \cdot \frac{D}{D_0} f \rho_1\right) R_0 \end{aligned}$$

但し f は火薬力、 D はそのときの爆速、 D_0 は理想的に完爆したときの爆速、 ρ_1 はその爆薬の見掛け比重、 R_0 は爆薬を球形としたときの半径、 R は衝撃波の爆源からの距離、 γ_1 は火薬ガスの比熱比、 γ は媒質の比熱比、 ε は衝撃波係数、 c は衝撃波の速度、 L は衝撃波の幅である。又 R を消去して衝撃波の速度と幅との関係は次の如くなる。

$$\begin{aligned} L \cdot \frac{2\gamma p_0}{\gamma^2 - 1} \cdot \frac{2\left(\frac{c}{a}\right)^4 - \frac{5\gamma^2 - 10\gamma + 1}{2\gamma(\gamma - 1)}\left(\frac{c}{a}\right)^2 + \frac{\gamma - 1}{\gamma}}{\left(\frac{c}{a}\right)^2 + \frac{2}{\gamma - 1}} \\ = \left(\frac{\varepsilon}{3(\gamma_1 - 1)} \cdot \frac{D}{D_0} f \rho_1\right)^{\frac{1}{2}} R_0 C^{\frac{1}{2}} \\ \left(\frac{4\pi g}{5.36\rho_0}\right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

但し p_0, ρ_0 は媒体の圧力と密度で a は其の中の静止音速である。

2. 此の理論式から衝撃波の速度と幅とを計算し、点火条件式と結合して $\text{CH}_4\text{-air}$ への引火試験の成績と数種の炭炭爆薬に就き比較するに計算値と実験値とがよく一致する。このことから消燃剤を相当量に含む粉状炭炭爆薬は衝撃により $\text{CH}_4\text{-air}$ に点火することが推定される。
3. 爆薬が爆発した際其の全エネルギーの中で衝撃波として傳達される割合を衝撃波係数と定義し、それを ε とすれば

$$\varepsilon = 1.05 \times 10^{-8} \frac{2p_0}{\gamma - 1} (D^2 - a^2)$$

として表わされる。但し D は爆薬の爆速、 a は媒質中の静止音速、 ρ_0 は媒質の密度、 γ はその比熱比である。

4. 爆発衝撃波の速度が 2,000 m/s 以上のとき $\text{CH}_4\text{-air}$ は点火され安定の detonation となる。
5. 爆薬による $\text{CH}_4\text{-air}$ への点火の機構は爆薬の性質により異なり、火焰や直接衝撃波や反射衝撃波の衝突等種々の因子により起り、夫等は爆薬の種類により区別される。
6. 衝撃波の坑道壁による反射波が集中的に衝突する位置は非常な高圧となり、 $\text{CH}_4\text{-air}$ への点火の源点となることを述べた。

終りに臨み本研究に際し有益なる示唆を与えられた東京電機大学櫻井明助教授に感謝の意を表すると共に、常に筆者と討論しつつ筆者の理論構成を援助された日本油脂武豊工場の清水達英氏、渡辺定五氏、友石尚之氏等の友情を多とし、又繁雑な数値計算に従事された同社佐藤晃氏と田中昭氏に御禮の言葉を申述べらる。

文 献

1. 村田：工業火薬協会誌、第 11 巻第 1 号、19 (昭 25)
2. Brinkley and Kirkwood: Phys. Rev. 71, 606 (1947), 72, 1107 (1947)
3. Polachek and Seeger: Explosives Research Report, No. 14, Navy Dept., Bu. Ord. Washington (Feb. and Aug. 1944)
4. Harisou and Bleakney: Phys. Dept. Prince-

- ton University (March, 1947)
- 5) Gilmore, Plesset and Crosseley: J. Appl. Phys. 21, No. 3, 243 (1950)
 - 6) Caldirola: J. Chem. Phys. (Aug. 1948)
 - 7) Taylor: Proc. Roy. Soc. London. A. No. 1065 (1950)
 - 8) Taub: Phys. Rev. 74, No. 3, 328 (1948)
 - 9) Stoner and Bleakney: J. Appl. Phys. 19, (July and Dec. 1948)
 - 10) Cassen and Stautou: J. Appl. Phys. 19, 803 (Sept. 1948)
 - 11) Neumann and Richtmeyer: J. Appl. Phys. 21, No. 3, 232 (1950)
 - 12) Bleakney and Taub: Rev. Mod. Phys. 21, No. 4, 584 (1949)
 - 13) T. Y. Thomas: J. Math. Phys. 28, No. 1, 62 (1949), 27, No. 4, (1949), 28, 153 (1949); 28, 91 (1949); Proc. Nat. Acad. Sciences. 35, 617 (1949) etc.
 - 14) 藤田: 京都大学理学部友近研究室, 研究速報, 第8号 (昭 22.6)
 - 15) Sakurai: J. Phys. Soc. Japan. Vol. 5 No. 2, 114 (1950)
 - 16) Becker: Zeit. für Phys. 8, 32 (1922)
 - 17) Taylor: Durand: Aerodynamic Theory Vol. 1, 218. (1935)
 - 18) L. H. Thomas: Note on Beckers, theory of shock front, J. Chem. Phys. Vol. 12 (1944) では Boltzmann の気体運動速度論の一次元で

$$u \frac{\partial f}{\partial x} = \iint \int (f'f_1 - ff_1') g h d b d e d v d w$$
 に於て, その解として $f_0 + f_1 + f_2 + \dots$ の形となり衝撃波の厚さは幾らでも厚くなり得るし, 決して Becker の理論のように物理的に無意味な程度に薄くならない。front thickness は 10^{-8} cm の桁である。
 - 19) Arons and Yennie: Rev. Mod. Phys. 20, 519 (1948)
 - 20) Brinkley and Kirkwood: Phys. Rev. 72, 1107 (1947)
 - 21) Sir Geoffrey Taylor: Proc. Roy. Soc. London, A. No.
 - 22) 村田: 工業火薬協会誌, 第11巻第1号, (昭 25)
 - 23) Berets, Greene and Kistiakowsky: J. Am. Chem. Soc. 72, 1086 (1950)

On the Ignition of CH_4 -Air Mixture by Shock Waves

III. Theoretical Study on the Ignition of CH_4 -Air Mixture by Explosion Shock Waves.

By Tsutomu Murata.

The propagation velocity and the width of explosion shock waves are determined theoretically according to the energy and detonation velocity of explosives.

Their mathematical relation is as follows:

$$L \cdot \frac{2\gamma p_0}{\gamma^2 - 1} \cdot \frac{2\left(\frac{c}{a}\right)^4 - \frac{5\gamma^2 - 10\gamma + 1}{2\gamma(\gamma - 1)} \left(\frac{c}{a}\right)^2 + \frac{\gamma - 1}{\gamma}}{\left(\frac{c}{a}\right)^2 + \frac{2}{\gamma - 1}} = \left(\frac{R_0}{R}\right)^2 \left(\frac{\varepsilon}{3(\gamma_1 - 1)}\right) \cdot \frac{D}{D_e} f \rho_1 R_0 \dots (1)$$

where f =force or specific energy of explosive; D =real detonation velocity; D_e =ideal detonation velocity when perfectly detonated; ρ_1 =bulk density of explosive; γ_1 =ratio of specific heats of explosion gases at constant pressure and constant volume; γ =ratio of specific heats of medium; R_0 =radius of spherical explosive; R =distance traversed by spherical shock wave; c =velocity of shock wave at R ; L =width of shock wave at R ; a =sound velocity in medium at rest; ε =coefficient of transmitting energy to shock wave.

Combining the above relation and the propagation equation of shock wave, we can eliminate R and obtain next equation.

$$L = \frac{2\gamma p_0}{\gamma^2 - 1} \cdot \frac{2\left(\frac{c}{a}\right)^4 - \frac{5\gamma^2 - 10\gamma + 1}{2\gamma(\gamma - 1)}\left(\frac{c}{a}\right)^2 + \frac{\gamma - 1}{\gamma}}{\left(\frac{c}{a}\right)^2 + \frac{2}{\gamma - 1}} = \frac{\left(\frac{\varepsilon}{3(\gamma_1 - 1)}\right) \cdot \frac{D}{D_c} f \rho_1^{\frac{1}{2}} R_0 C^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{4\pi g}{5.36\rho_0}\right)^{\frac{1}{2}}} \dots\dots (2)$$

where p_0 =pressure of medium at rest; ρ_0 =density of medium at rest.

The condition of ignition of CH_4 -air mixture by shock wave is

$$L = \frac{cAe^{E/RT}}{p^n} \dots\dots (3)$$

where E =activation energy of ignition of 9% CH_4 -air=28,600 cal/mol; p =pressure

of shock wave; T =temperature of shock wave; $n=2.05$; $A = \frac{1}{7.33 \times 10^5}$. And the

coefficient of transmitting energy is

$$\varepsilon = 1.05 \times 10^{-5} \frac{2\rho_0}{\gamma - 1} (D^2 - a^2) \dots\dots (4)$$

We are able to calculate the quantity of an explosive from the equations (2) and (3) to ignite CH_4 -air mixture. Experimental data of the coal mine explosives in testing gallery for ignition of CH_4 -air mixture are coincident with the calculated quantities of the same explosives.

Then we conclude that the ignition by coal mine explosive containing sufficient inhibitors such as sodium chloride or sea-weed is caused by explosion shock wave.

Coal mine explosives whose detonation velocities are so small that they can not ignite CH_4 -air mixture by direct shock waves may ignite CH_4 -air mixture by action of concentrated focal collision of the reflected shock waves, and their minimum quantities to ignite are dependent on and varied with the diameters of testing galleries.

Gaseous mixture of methane and air is ignited and reaches its stable detonation velocity when compressed by an explosion shock wave of 2,000 m/sec.

(Nihon Oil and Fats Co., Ltd., Taketoyo Factory)

前号 村田勉：海藻と食塩とを配給した炭礦用爆薬に就て

正 誤 表

卷	号	頁	段	行	誤	正
11	3	186	右	20	比較的速い	比較的遅い
〃	〃	〃	〃	26	衝撃波の作用	衝撃波の反射波の作用
〃	〃	187	〃	33	61.2	71.2