

凝縮多成分系の爆轟

—第五報 三種の液体爆薬の爆轟特性について—

藤原 修三*・日下部 正夫*・足田 強**

ニトロメタン, (NA-AN)_{st}, 硝酸メチルは原子組成, その他が比較的似た液体爆薬であるが, 衝撃感度, 伝爆性 (H. V. D. の限界径), 爆轟型に著しい差がある。衝撃感度は L. V. D. の有無が重要であり, 伝爆性, Spin 型 H. V. D. アルミ板への爆痕模様は, Schelkin-Dremin の中断理論に定性的根拠を与えるものと思われ, これら均一系の液体爆薬の H. V. D. はそのメカニズムが気体爆轟のメカニズムと似ていることに起因するものであろう。

序 前報において, ニトロメタン¹⁾, 硝酸アセトニトリル混合物²⁾, 硝酸メチル³⁾ について, 各爆薬の爆性, および不活性液体の爆轟におよぼす効果について報告したが, 本報においてはこれら三種の液体爆薬の爆性を総括し, 実験において観測された特異現象について述べる。

1. 液体爆薬の諸性質

Table-1 にニトロメタン (N. M.) 硝酸-アセトニトリル化学量論比混合物 ((NA-AN)_{st}), 硝酸メチル (M. N.) の本実験で観測された諸性質を掲げる。三種の爆薬は, 原子組成, 比重, 爆発熱, 高速爆轟伝播速度が似かよっているが, 衝撃感度, 伝爆性, 爆轟型に差が見られる。以下各項目別に論ずる。

Table 1 液体爆薬の比較

	ニトロメタン	(NA-AN) _{st}	硝酸メチル
分子式	CH ₃ NO ₂	CH _{2.6} N _{1.6} O _{3.3}	CH ₃ ONO ₂
化学的性質	ニトロ化合物	混合爆薬	硝酸エステル
比重 (20°C)	1,138	1,235	1,217 (15°C)
爆発熱 (Kcal/g) ①	1,113	1,455	1,416
比容 (l/kg) 0°C ②	1,100	773	743
弾道白砲値 (TNT=100)	120~130 ③	144	180~190
衝撃感度	1 m 以上 ④	1 m 以上	<20cm>
爆轟型	H. V. D. のみ	H. V. D. のみ	H. V. D., L. V. D. その他
爆速 (安定爆速) (m/sec)	6370±100	6600±100	{6700±60 {2500±40
伝爆可能径 (ガラス管)	20 mm	1.6mm 以下 0.3mm 以下 (くさび)	{H. V. D. →10mm 以上 {L. V. D. →1.6~3mm

注 ①②は計算値である。 ③は推定値 ④は N. G. との比較から推定する。

1-1 衝撃感度に関する考察

Watson⁴⁾ によればニトログリセリン等の液体爆薬の低速爆轟 (以下 L. V. D. と記す。) を誘起するのに必要な衝撃圧力は数 Kbar (1.5Kbar 程度) であるが, 一方ニトログリセリンの高速爆轟 (以下 H. V. D. と

記す。) を誘起するのに必要な衝撃圧力は, Dremin⁵⁾ らによれば, 130~150 Kbar である。又 Voskovoïnikov⁶⁾ らによれば, N. M. の H. V. D. 誘起衝撃圧力は 90~100Kbar であり, これらの報告例より考えると, 衝撃による起爆では, H. V. D. の方が L. V. D. よりも一桁以上大きな圧力を必要とする。100Kbar 程度の衝撃圧力は, 凝縮系爆薬の爆轟とか, 超高速飛翔体の衝突等の方法以外では, 一般には発生させる事は

昭和46年6月10日受理

* 東京工業試験所第7部 平塚新富87

** 東京大学工学部 文京区本郷7-3-1

不可能であろう。しかし、数 Kbar 程度の衝撃圧力は容易に発生し得る。以上の事からして、H. V. D. のみを行なう N. M., (NA-AN)_{st} が通常の落槌試験機による衝撃に対して極めて、鈍感な挙動を呈するのである。

1-2 限界径に関する考察

三種の液体爆薬の H. V. D. において顕著に異なる性質はその限界径である、Table 1 に示されるとおり、(NA-AN)_{st} は測定不可能な限界径を有する。三種の液体爆薬の H. V. D. 限界径は、常温においてガラス管使用の場合、N. M. は約 20mm、硝酸メチルは約 10 mm、(NA-AN)_{st} は 1.5mm 以下であり、混合爆薬である (NA-AN)_{st} は極めて伝爆性が良い。この理由は Dremine⁷⁾-Schelkin⁹⁾ らの爆轟波面の不安定性に基づく、限界径理論によつて説明される。(注、参照) 彼らの理論によれば、均質系爆薬の爆轟伝播においても Dark-Wave (Dark Zone, 非反応領域) が存在し、これは、Shock front 又は C. J 面に乱れが存在する時に生じるもので、したがって管壁等では特に流れが乱れやすいため Dark Wave を生じやすい。このような乱れを伴う波面構造において、乱れ(不均一性)の大きさが薬径に比較して無視できない時、爆轟中断を呈するというのが Dremine, Schelkin 理論の中核である。ニトロメタンの爆轟において、限界条件に近づけると(例えば、薬径を小さくしたり、不活性液体でうすめる場合) Shock front の乱れが大きくなる事が、Mallory⁹⁾⁽¹⁰⁾ により詳しく観測されている。Dremine, Schelkin らの理論にしたがえば、(NA-AN)_{st} は極めて波面の乱れが小さいため、小限界径を有するものと考えられるが、これは Zel'dovich⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ らの実験により根拠を与えられる。つまり Shock front が非常に平面性が良ければ、光に対して Shock front は鏡面になると考えられ、これに光束を照射し、反射光を観測すれば波面の乱れを知り得る。Zel'dovich⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ らは硝酸、ジクロロエタンの種々の組成比混合物を平面爆轟装置を用いて一次元起爆を行ない、硝酸-ジクロロエタン混合物の爆轟波面に光束をあて反射光を観測し爆轟波面の乱れを測定している、Zel'dovich らの結果によれば、硝酸-ジクロロエタン混合系では、化学量論比混合物、量論比から±20% (体積) 異なつた混合物でも、又温度を-20°C に下げ爆轟伝播を困難にさせた場合でも、彼らの装置(1μ程度の分解能を有する。)では波面の乱れを測定できなかったとしている。つまり、硝酸-ジクロロエタン系は極めて波面の乱れが小さく安定な爆轟を行なう。又一般に硝酸、燃料混合物は極めて小限界を有することが知られているが、これは硝酸のいかなる物理、化学的性質に起因するのか、

現在のところ不明である、しかし Zel'dovich らの実験でも示されているように、(NA-AN)_{st} も含めて、硝酸混合物は極めて、爆轟波面の乱れが小さいゆえ、小限界径を示すものと考えられ、この事は Dremine, Schelkin の限界径理論に定性的根拠を与えるものと思われる。

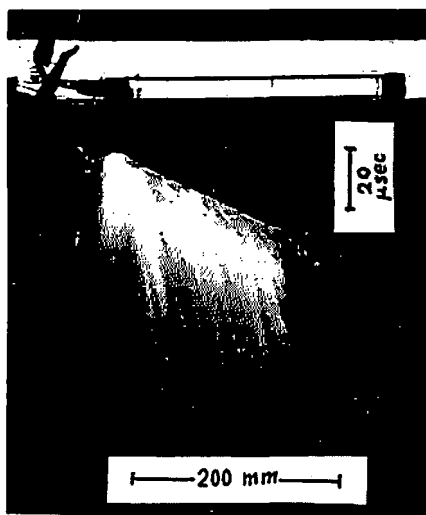
1-3 L. V. D. と H. V. D.

Table-1 に示されるように、三種の液体爆薬の有する性質のうちで、奇妙なことは、液体爆薬においては、L. V. D. を行なうものと、そうでないものが存在するということである。すなわち N. M., (NA-AN)_{st} は H. V. D. のみを行ない、硝酸メチルは L. V. D., H. V. D. の二つの反応形態を示す典型的な液体爆薬である。何故液体により H. V. D. しか行なわないものと、そうでないものが存在するのか、この理由も不明であるが、この事実の解明は非常に重要で、爆轟反応の本質にふれるものであろう。

2. 特異現象

2-1 ニトロメタン混合物のスピニング型爆轟

スピニング型爆轟は爆轟限界条件下での気体の爆発によく観測されたもので不安定爆轟の代表例である。スピニングのピッチの定量的取扱いは Fay⁽¹³⁾ 等により行なわれているが、Schelkin⁽¹⁴⁾ によると、前述した爆轟波面の乱れが管径のオーダーに匹敵してくると、Spin 型か、Pulsating 型の不安定爆轟を行なうとしている。Fig. 1 の写真に見られるニトロメタン混合物の凝縮系液爆薬の爆轟においても、スピニング型デトネーシ



Shot No. 3195

N. M. : (Et/n. pentane 2/1) = 90/10

φ_{in} = 22.5 mm (glass)

D = 5.87 km/sec

Fig. 1 Spin Mode H. V. D. of NM Mixture

ンが観測されることは興味深い。Fig. 1 に示されるような不安定爆轟が液体においても行なわれるという事は、Dremin¹⁵⁾らが述べているように、均一系の液体爆轟の機構と気体爆轟の機構が類似しているからであろう。

2-2 アルミ板への爆痕模様

(NA-AN)₈₅ と CCl₄、又は CHCl₃ との混合物を前報で述べた²⁾ アルミ-アルミ製くさび容器を用いて爆轟させ、後、容器を回収するとアルミ板へは Fig. 2 に概略示されるような爆痕が爆轟中断近傍にみられる。CHCl₃ 混合物の場合、Fig. 2 の距離、a は大きく、模様は複雑であるが CCl₄ 混合物の場合、a は小さく、中断近傍の模様は複雑でない。このような爆轟 (H.V.D.) 中断近傍の爆痕は Seely¹⁶⁾ らも観測しており、Dark Wave、Over velocity Detonation (O.V.D.) 等に起因するものと考えられる。爆轟中断を起こすような条件下 (例えば、限界径近傍) では、C.J 爆轟以外に、O.V.D. と Dark Wave の存在が優勢となり、これらの軌跡が複雑な爆痕を管壁に刻むもので、O.V.D. の軌跡は深く、Dark Wave のみで反応の生じなかつた所は浅い爆痕を残すものと考えられる。したがって (NA-AN)₈₅ 混合物の爆轟において刻まれた Fig. 2 に示すような爆痕は Dremin の中断理論 (注 参照) に定性的根拠を与えるものと思う。

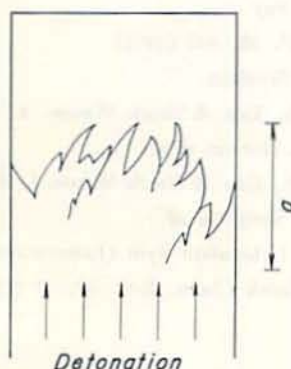


Fig. 2 アルミ板への爆痕

注 Dremin の中断理論

Dremin の中断理論、別名限界径理論を要約すると、Fig. 3 図において、管壁 (図の左側部分) より非反応波で希薄波である Dark Wave が管の中心に (図の右方) 向かって進行し、非反応領域 (Dark Zone) を拡大する。Dark Wave の背後は圧力が低いため、C.J 爆轟の Shock front 背後の温度に比較して低温となる。そのため反応開始の誘導時間が長くなり、反応開始が遅れる。この Dark Wave 背後 (Dark Zone) で遅れて生じた反応は、すでに圧縮されている系を伝播

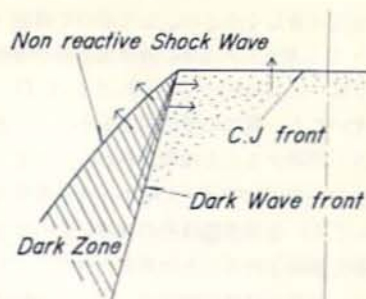


Fig. 3 Dremin's Failure Theory

するため O.V.D. を呈し、その伝播速度は通常の C.J 爆轟速度よりも速い。爆轟伝播において限界条件近傍では、常に O.V.D.、Dark Wave が存在し、壁より管の中心に向かって進む Dark Wave が中心に到達する以前に O.V.D. が Dark Wave に追いつけば中断は生じないが、追いつけない場合中断を生じるというのが Dremin の中断理論である。

2-3 硝酸メチルの異常低速伝播反応

硝酸メチルは H.V.D. ($D=6.7\text{km/sec}$) と L.V.D. ($D=2.5\text{km/sec}$ ガラス管) を呈する典型的な液体爆薬であるが、金属管 (アルミニウム、銅) では、爆発すると Fig. 4 の写真に示されるような伝播速度が 0.5km/sec 前後の低速反応を行なう。この反応の伝播速度は L.V.D. の $1/3 \sim 1/5$ 程度の低速であるにもかかわらずその伝播速度はほぼ定常である。 $P=1/4\rho D^2$ 則を用いて反応圧力を推定すると 1kbar にも満たないし硝酸メチルの推定音速 ($1 \sim 1.5\text{km/sec}$) より



Shot No. 11243
M.N.
 $\phi_{in}=6.0\text{mm(Al)}$
 $D=0.5\text{km/sec}$

Fig. 4 Extraordinarily Low velocity Reaction Wave of M.N

も伝播速度は著しく小さい。したがって爆燃 (Deflagration) とも考えられるが、液体爆薬等の爆燃の特徴は、まず第一に Maček¹⁷⁾ によれば L.V.D. へと転移しやすいこと、第二に反応圧力が小さく、金属容器等を小さく破砕することは考えられないことである。例えば $\rho_0 \approx 1.0$, $D = 0.4 \sim 0.6 \text{ km/sec}$ の黒色火薬の爆燃においても、金属容器はその強度に応じて変形するが、微細に破砕されることは考えられない。しかるに硝酸メチルの異常低速反応では、長い伝播距離 ($l = 200 \sim 300 \text{ mm}$) を低速でかつほぼ定常に伝播し L.V.D. への転移はみられない。又、爆発後容器を回収すると L.V.D. を生じたと同程度に容器は破砕されている。以上のことからして、この異常低速反応が何であるか (特殊な L.V.D., 又は Rapid Deflagration) の判定は現在のところできないが、安定した伝播速度を有しかつ反応圧力のかかなり大きいと推定される不思議な反応形態である。この反応は反応論的にも興味ある現象であるが、安定して起こさせることが可能になれば、超低速火薬として工業的利用価値があると思われる。

その他硝酸メチルには Spin 型 L.V.D. という現象も観測しているが、L.V.D. に関しては次報にゆずる。

3. ま と め

結論として、ニトロメタン, (NA-AN)_{st}, 硝酸メチルは原子組成その他が比較的似た液体爆薬であるが、衝撃感度と H.V.D. の限界径、爆轟の型に著しい差異がある。衝撃に対する感度は L.V.D. の有無が重要な影響を与えるものと考えられ、伝爆性 (限界径) 及び Spin 型 H.V.D. アルミ板への爆痕模様は、Schelkin-Dremin の中絶理論で説明され、これらに定性的根拠を与えるものと思われ、液体爆薬の H.V.D. はその機構が気体爆轟の機構に類似しているものと考えられる。

文 献

- 1) 藤原修三, 疋田強, 日下部正夫
工火誌, 30, 77 (1969)
- 2) " 31, 132 (1970)
- 3) " " " "
" 32, 137 (1971)
- 4) R.W. Watson
12th Combustion Sym. 723 (1969)
- 5) A.N. Dremin et al
Comb. Exp. & Shock Waves. 3, 6 (1967)
- 6) I.M. Voskoboinikov et al
Comb. Exp. & Shock Waves 4, 23 (1968)
- 7) A.N. Dremin et al
9th Combustion Sym 839 (1965)
- 8) K.I. Schelkin.
Soviet Phys. Uspekhi 8, 780 (1966)
- 9) H.D. Mallory et al
J.A.P., 37, 4798 (1966)
- 10) " "
" 38, 5320 (1967)
- 11) Ya.B. Zel'dovich et al
Soviet. Phys. Doklady 9, 851 (1965)
- 12) " "
" 11, 936 (1967)
- 13) J.A. Fay.
J.C.P. 20, 942 (1952)
- 14) K.I. Schelkin
Comb. Exp. & Shock Waves. 4, 23 (1968)
- 15) A.N. Dremin et al
Comb. Exp. & Shock Waves 1, 63 (1965)
- 16) L.B. Seely. et al
5th. Detonation Sym (International) 65 (1970)
- 17) A. Maček Chem. Rev. 62, 41 (1962)

(訂正
137号 Vol.32 No.2 p.90, 91 写真の説明が逆)

Detonation in Multi-Components Condensed Phase (V) On Detonation Features of Three Kinds of Liquid Explosives

S. Fujiwara, M. Kusakabe and T. Hikita

Three kinds of liquid explosives; i.e. nitromethane, methyl nitrate and nitric acid-acetonitrile mixture, were adopted to examine their detonabilities, liabilities to low velocity detonation, or sensitivities.

Some abnormal aspects in explosions were found.

The high sensitivities in fall hammer tests for nitric esters like methyl nitrate or nitroglycerine were ascribed to their liabilities to low velocity explosions.

It seemed that the small failed diameter and the wall trace just before the failure of explosion of nitric acid-acetonitrile mixture gave the evidence to Dremine-Schelkin's failure theory.

(The Government Chemical Industrial Research Institute, Hiratsuka, Kanagawa Japan and Faculty of Engineering, Univ. of Tokyo, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo.)

新 著 紹 介

Modern Optical Methods in Gas Dynamic Research, D.S. Dosajh 編 Plenum Press (1971)

本書は New York, Syracuse の Syracuse 大学で開かれた Symposium on "Progress in Gas Dynamic Research by Optical Methods 1970 年 5 月 25—26 日の議事録で高速気体流に関する最近の実験誌と解析法に関し提出された諸文の集積である。全頁数 295, 16 篇の論文よりなっている。著者は米国とカナダ人のみである。主な内容は次の通りで、火薬の爆発に伴う高速気流の研究に直接応用できるものが多い。

衝撃波管でガスに衝撃波を送り、 10^4 °K に瞬間加熱をし、発光スペクトルより原子、分子の分光学的研究ができる。その結果波長、強度、転移確率、エネルギー移動様式が明らかにされた。原子線では真空紫外領域、分子では新帯の発見もある。

非平衡流の放射に関しては窒素原子の励起機構と一重項励起を $6600\text{\AA}$ の波長で 5 km/s , 1 mmHg の衝撃波発光で研究した。緩和曲線を計算し実測との一致を検した。また、これを真空紫外吸収分光実験よりも検討した。

プラズマ測定の誤差に関してはその諸因子は多く十分の注意を要することをのべている。1962 年以前はキング炉が唯一の測定手段であったが、衝撃波管が使用されてよいデータを得られるようになった。例えば弱い発光に対しては正確な比転移確率値を適用でき測定可能となった。この場合も反転や線幅に注意を要する。衝撃波管では (1) ガス動力学温度、

(2) 反転線温度が同時測定できるが、この後者もレベルの異なるものを用いて同時に測定できる。これが一致するか否かがチェックに役立つ。その外転移確率に関する多くの誤差が明らかにされており、従来の発表データを使用するに十分検討することが温度誤差をさけるに必要である。

ガス流の観測に重要な因子の屈折率の研究の 25 年間のまとめを述べた章がある。屈折率の Grad はシェリーレン写真に重要だが、これは高温解離ガスについて計算すること、粒子による偏光消滅、共振周波における異状屈折率、これを干渉分光系に応用して、衝撃波加熱した Fe 原子線を記録すること、その干渉系の簡易化の実例もある。

巨大ルビーレーザー光で空中放電を起こさせ、その状況と同じレーザー光により干渉瞬間写真を撮影した。またホログラムも撮影でき、火花の移動速度も測定できる。

干渉計とホログラムを組合せた光学系で、接融合研究用テーパピンチ写真、さらにその映画も撮れる。稀にプラズマにレーザー光を照射し散乱光を解析して、電子密度、電子温度、波長シフトなどを知ることができる。

化学反応により励起準位により多くの原子、分子を生成した場合、適当な共振器に入れると発振してレーザー光を出すことが知られたのは数年前のことであつたが、急速に発展して、出力は数百ワット、波長範囲は可視、UV、IR になり、しかも連続発振可能になった。F+HCl, O+CS, H+Cl₂, Cl+HI, HCl+CO₂ などの発振が知られた。(水島容二郎)