

固体液体混成系爆薬の爆轟伝播の機構

疋田 強・藤原修三*

1. 序

本報告は固体粉状爆薬と不活性液体、液体爆薬と不活性固体、不活性固体を含む鋳造薬などの混合系の爆轟伝播の特性を巨視的に把握しようとする一つの試みである。

粉状爆薬に不活性液体を混和すると爆速および猛度が著しく増大する事実はすでに古く Schmidt¹⁾, Urbanski²⁾らにより見だされており、前者はこの現象をコポリウム因子から、後者は液体の音速が爆速に附加されるという仮説から説明した。しかしいずれも混成系の爆轟を統一的に説明しうるものでなく、新しい解釈が必要である。

最近工業用スラリー爆薬が次第に進出してきたが、この際水分は爆轟にいかなる影響を与えているのか未だ適確な説明はなされていない。一般にアンホやスラリーなど不安定爆薬を行う系の挙動は極めて複雑であつて解明が困難であるので、我々は先ず最初に最も簡単な二元系として、ヘキソゲン (RDX) やペンスリット (PETN) などの単一爆薬と不活性液体特に水 (H₂O) との混合物の爆轟特性から、混合系中の不活性液体の役割を推定することとした。

我々は水は反応帯中において反応に参与せず単に衝撃波媒体として働くという仮説を立て、インピーダンス適合法を適用して理論爆速を算出し、実験結果を説明することができた。本理論はスラリー、アンホなど反応帯の長い爆薬にはそのままの形では適用し難いが、混成系爆薬の一つの側面を理解するのに重要であると信ずる。

2. 理論

固体内衝撃波理論において、衝撃波が一物質より他物質へ進入するとき、界面において両者のショック・インピーダンスは等しいという仮説が広く使われる³⁾。

ショック・インピーダンスとは衝撃波速度 D と初密度 ρ_0 の積であり、これは衝撃波理論より、波面圧力 P をその場所の粒子速度 W で除した値に等しい。

$$\rho_0 D = P/W \quad (1)$$

すなわち、 $P-W$ グラフ上で原点よりの直線の勾配を表わす。

我々はインピーダンス適合法を二元系爆薬に適用するに当り次の諸仮定をおく。

1) 爆薬系が固体と液体のみより成り、空隙を含まない。空隙を含む場合については仮定 (5) の考えから補正を行なう。

液固二元系で爆薬粒子は単結晶とし、不活性液体の代表として水をとる。結晶と水は統計的に見て Fig. 1 の如く交互に等間隔配置をとるものとする。

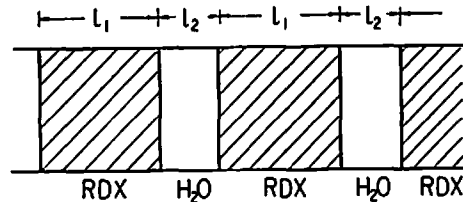


Fig. 1 One dimensional pattern of the explosive

2) 固体と液体の界面でショック・インピーダンスは適合するものとし、水中を伝わる衝撃波は減衰しないと考える。

3) 爆薬粒子に突入した衝撃波は直ちに爆轟波に発展し一定速度の爆速で進むものとする。この仮定には反応は瞬間的に完了し、波面圧は Chapman-Jouguet 面圧力で表わされることを暗黙のうちに含んでいる。

4) 爆発熱の水層への熱伝導を無視する。水は衝撃圧縮による加熱を受けるのみで爆轟ガスよりの熱伝導を受けない。すなわち $C-J$ 面においては水と爆轟ガスとは熱平衡状態にならずに異なる温度をもつ (二温度モデル)。

もし水が爆轟ガスと熱平衡にあると仮定して計算すると、RDX : H₂O = 85 : 15 のとき $T_{C-J} = 1300^\circ K$ (木原・疋田の式による) となるが、これでは低すぎて爆轟反応の高速を説明できない。

水の気化がおこり爆轟ガスと平衡状態に近づくのは $C-J$ 面以後においてであると考えられる。

昭和43年10月30日受理

* 東京大学工学部燃料工学科 東京都文京区本郷 7-3-1

5) 爆薬系から気体空間への衝撃波発生に対して、インピーダンス適合法が適用できることはすでに報告した³⁾。

しかし爆薬系に多数の微小な気泡が存在するような系に対してはインピーダンス適合法の適用は困難である。液体にくらべ、気体は圧縮性が極めて高く、したがって温度も非常に高くなるが、反面圧力は激減する。しかもインピーダンス適合法の一定値に至るまでにある距離が必要であり、それは通常爆薬系中の空隙の長さよりも大きい。

したがって爆薬系にかなりの空隙が存在する場合については、空隙が爆薬粒子中に含まれるものとし、空隙と固体粒子の和から爆薬の仮比重を定め、その仮比重における爆薬の爆速(実測)を爆薬層の爆速とする。この値と水層とのインピーダンス適合から、最終の爆速が得られる。

以上の仮定に基づいて固体液体混成系の爆薬特性を計算するには次の値が必要である。

a) 固体の各密度での爆速と爆薬圧 (P_{C-J})

(1) 式より P/W は分る。また単一高性能爆薬では爆速値から $P_{C-J} \approx \rho_0 D^2/4$ で P_{C-J} を近似計算してもよい。

b) 液体の $R-H$ 曲線。単一の液体については多くの実験が行なわれデータも多い⁶⁾。しかし水溶液についての実験はなく、それぞれの場合について衝撃波特性の測定を行なわねばならない。一般に固体液体中の衝撃波速度 D_s と粒子速度 W_s とは直線関係があり、定数 a, b が多くの物質について求められている。

$$D_s = aW_s + b \quad (2)$$

さて RDX-H₂O 系について衝撃波に関する $R-H$ 関係を $P-W$ グラフに描いたのが Fig. 2 である。H₂O の $R-H$ 曲線は Walsh ら⁶⁾、RDX($\rho_0=1.767$) については Deal⁷⁾ の値: $D=8639\text{m/sec}$, $P_{C-J}=338\text{kb}$, $W_{C-J}=2213\text{m/sec}$ を採り、これを A 点とする。A 点を通る RDX 爆薬ガスの $R-H$ 曲線も計算できるし、それは Fig. 2 の A 点を通る点線 ① のようになるであろうが、ここでは近似的に OA 直線をもつて RDX ガスの特性を表わすものとする。

RDX の $C-J$ 爆薬圧が水層に入るときの圧力は Fig. 2 の B 点で与えられる。インピーダンス適合法より OA 直線を A 点で縦軸対称に反転した AB 直線と水の $R-H$ 曲線の交点 B が求める値ある*。等角で

* 実際は A 点を通る点線について反転するべきであるが、この曲線の計算が厄介であり、実際 B 点の値がそれほど大きな差が出ないので、ここでは近似法で十分であると考えた。

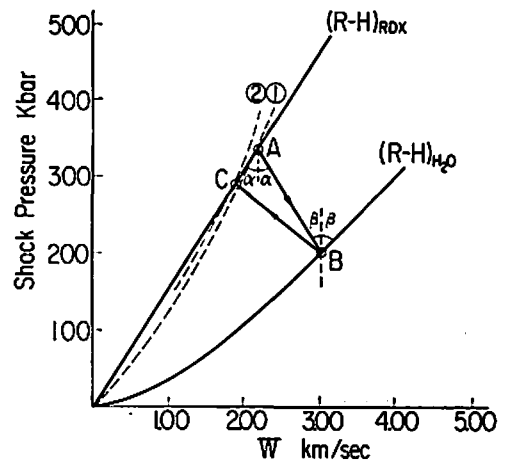


Fig. 2 Shock Hugoniot Curves of RDX and H₂O and impedance matching between both components

反転した理由は界面で爆発ガス中に反射する波(この場合は希薄波)は進行方向が逆転している為である。

次に水層を伝わる衝撃波が再び RDX 粒子に入るときの圧力は水の $R-H$ 曲線を B 点で反転した曲線 BC と未反応 RDX も OA 直線で近似すると、交点 C が求める値となる。

上記のように B 点, C 点はともに近似が入っており, B 点はこれよりやや強く, C 点はやや高くなるはずである。しかし仮定 (3) により直ちに爆轟状態に入るので C 点の多少のずれは問題にならない。

このような図上解法の他に、数式を使つても容易に B, C 点の P, W 値を計算しうる**。

さて爆薬中に投入された衝撃波がある圧力以下では

** 爆轟波中の特性を添字 1, 液中を添字 2, 未反応爆薬中を添字 3 で表わす。固液体中の衝撃波速度は一般に粒子速度と一次関係が存在することが知られており、定数 a, b が測定されている⁶⁾。

$$D_2 = aW_2 + b \quad (2)$$

(1), (2) 式とインピーダンス適合法の直線近似 (Fig. 3 の三角形 OAB を考え, OA, AB, BC を直線で近似する) から

$$W_2 = \frac{[(b\rho_2 + \rho_1 D_1)^2 + 4a\rho_2(\rho_1 D_1 W_1 + P_1) - (\rho_1 D_1 + \rho_2 b)] / 2a\rho_2}{2} \quad (3)$$

(2) 式より D_2 , (1) 式より P_2 を知る。

また

$$W_3 = \frac{1}{2a\rho_2} [(4a\rho_2 W_2 + b\rho_2 + \rho_1 D_1) - \sqrt{(4a\rho_2 W_2 + b\rho_2 + \rho_1 D_1)^2 - 4a\rho_2(4a\rho_2 W_2^2 + 2\rho_2 a W_2)}] \quad (4)$$

また $P_3 = \rho_1 D_1 W_3$ より P_3 を知る(未反応爆薬も爆轟ガスも同じ直線で近似しているので速度 D_1 は同じになる)。

爆轟にならない。この最低臨界圧力は Campbell 其他人々により測られている¹⁰⁾。

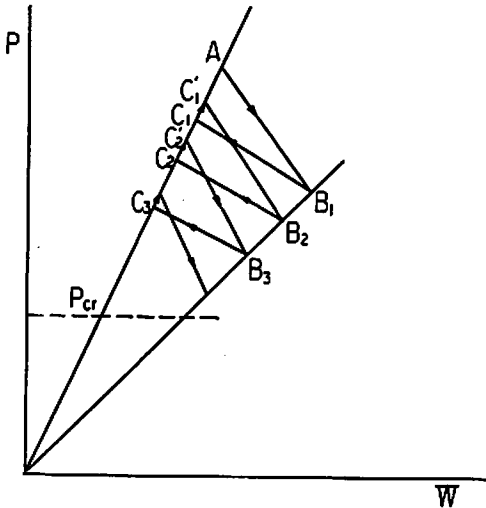


Fig. 3 Scheme of degradation of detonation

もしも仮定 (3) のように入射衝撃波が直ちに爆轟状態へ移行しないならば、Fig. 3 に模式的に示したように、 B_1 から C_1 へ入った波が C_1 まで反応による圧力上昇を示して、水層に入り B_2 状態となり、これがまた爆薬中に C_3 の衝撃波を送り C_3 まで行って B_3 へ……などと次第に減衰し、ある臨界圧 P_{cr} に至ればもう爆轟はおこらなくなる。このような階段降下は極めて急速におこるものと考えられる。

混合する不活性液体の量がある限度を越すと、水層の長さ (Fig. 1 の l_2) が長くなり、最早仮定 (2) が成立しなくなる。

水中での衝撃波の減衰は、そこから爆薬粒子中へ入射する波の圧力を低下させ、反応速度を低めるから、Fig. 3 のプロセスと似た経過を辿ることになる。そして反応速度に対応した爆速の所で安定するか、または中断してしまう。

さてインピーダンス適合法による混成系の見掛けの爆速として次式が得られる。

$$D_r = \frac{l_1 + l_2}{l_1/D_1 + l_2/D_2} = \frac{(1+\mu)(aW_2+b)D_1}{\mu D_1 + aW_2 + b} \quad (3)$$

ただし

$$\mu = l_2/l_1$$

また波面圧力 P_r は正確には求め難いので、近似式として

$$P_r = \frac{P_1 + \mu P_2}{1 + \mu} \quad (4)$$

をとる。

3. 計算値と実験値

本法に従つて計算した理論爆速と水添加量の関係を Fig. 4 に示す。

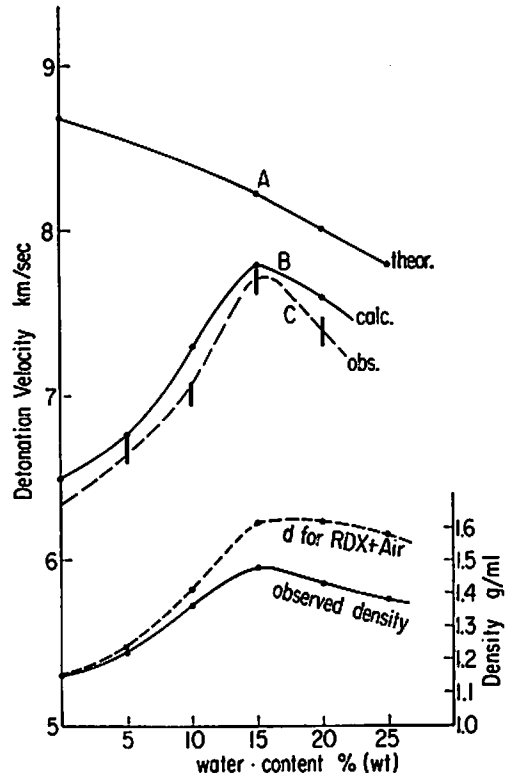


Fig. 4 Detonation velocities and densities of RDX-H₂O system and detonation velocities calculated by means of Impedance-Matching Technique

Fig. 4 の A 曲線は空隙なしの RDX 単結晶と水の混合系の理論爆速であり、空隙がなければ水を添加するにつれて爆速は漸減することを示す。

B 曲線は実験試料 (粒径 0.05~0.18mm のもの 70% 以上を含む RDX と水の混合物) 中の気泡含有量を見掛け比重の測定値より算出し、RDX 結晶と気泡との和から爆薬の見掛け比重を求め、それに対する実測爆速と爆轟圧として文献値¹¹⁾ (理論計算してもよい) を採用し、それ以後はインピーダンス適合法で計算したもので、いわば実際の混成系についての理論爆速曲線である。

B 曲線では水分 15% で爆速は極大値を示し、それ以後は減少し、A 曲線と同様の傾向を示す。本実験では最初見掛け比重 1.15 の RDX から出発し、それに水を添加してよく混合した系について比重と爆速を測定した。Fig. 4 の下部にその実測比重を実線で、また

Table 1 Determination velocities of explosives mixed with inert liquids

爆 発 系	比 重	爆 速 m/sec
RDX	1.15	6300
RDX+H ₂ O (20%)	1.43	7250
RDX+[NaNO ₃ (8)+H ₂ O(10)] 20%	1.53	7950
RDX+[ZnCl ₂ (2)+H ₂ O(1)] 20%	1.73	8110
RDX+[NH ₄ NO ₃ (2)+H ₂ O (1)] 20%	1.50	7590
RDX+[NaClO ₄ ·H ₂ O(2)+H ₂ O(1)] 20%	1.65	8400
RDX+Glycerine (20%)	1.54	7850
RDX+Vaseline (15%)	1.41	7100
TNT+[NaClO ₄ ·H ₂ O(2)+H ₂ O(1)] 25%	1.51	7600
Tetryl+[同 上] 20%	1.65	7900
PETN+[同 上] 20%	1.45	7150
PETN+[同 上] 40%	1.51	7650

混成系から水分を除外したものを見掛け比重(RDX+空気)を点線で示した。

実測爆速は径 10mm のビニール管 (薬径 2~10mm で爆速はほとんど一定) で 6号電気雷管と 2g ペンスリットにより起爆し, ドートリッシュ法またはイオンギャップ法で測定したものの平均であり, 偏差は約 200m/sec である。

Fig. 4 から分る通り, B 曲線は実験値とよく一致している。

もしも最初から高密度 RDX を製作し, それに水を添加してゆく方法をとるならば, B 曲線は次第に A 曲線に近接してゆくであろう。

B 曲線で水分 15% まで爆速が増加してゆくのは, 混成系中の空気を水分が置換したためで, 空気より水の方がショック・インピーダンスが遙かに大きく, 爆轟圧の減衰が少ないためと考えられることができる。

水 15% 以上の所で A 曲線と B 曲線にかなり差があるのは, 実験試料が単に混合操作のみで製造されたもので, 圧搾操作を含まないためと考えられる。やはりこの辺でも空隙が存在するのである。

B 曲線に極大が存在する理由は上述のことから推測できる。本来は水の添加は A 曲線のように RDX 爆速を低下させる。

しかし低比重爆薬に水を加えると見掛け比重はある混合比まで増加する。これが爆速増加を招く主要素である。しかしそれは通常の比重と爆速の関係とは異なり, 水は反応に参加するのではなくに衝撃波を伝える媒体として働いていると考える。

4. TNT-Al 系の例

またもう一つの例として TNT と粉末アルミニウム

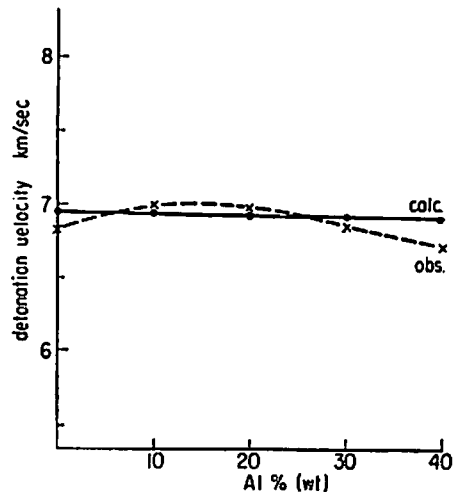


Fig. 5 Observed and calculated detonation velocities of TNT-Al system

を混合し鑄造した系について, インピーダンス適合法について計算した例と日野博士の実験例¹²⁾とを Fig. 5 に示す。この混合物でアルミニウムは RDX-H₂O 系における水の役割と同様に C-J 面までは単に衝撃波を伝える媒体として働くという考えで計算したものであり, 実測値と良い一致を示している。

アルミニウムを 40% まで加えても爆速がほとんど変化しないというのは, TNT と Al のショック・インピーダンスが互いに近接しており, Al は C-J 面までにおいてあまり反応に参加しないという仮定の正当性を示すものとする。

5. 考 察

1). インピーダンス適合法は, 本来は空間のない液体固体 2 成分系の爆薬で, 片方が不活性または反応性

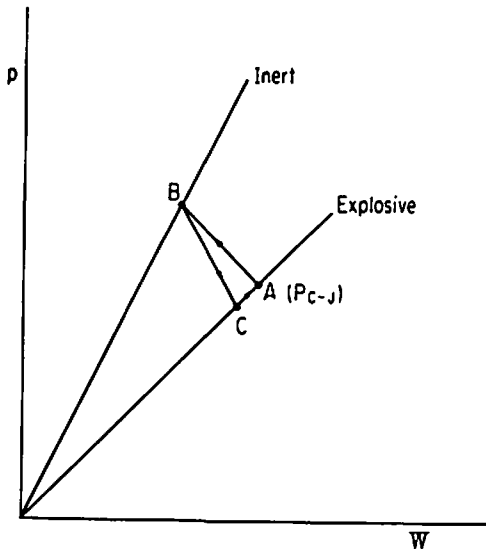


Fig. 6 A method of making higher brisance explosive

の低い物質である場合に、その系の爆轟特性を推定するのに有効な方法であると考え。しかし、上例のように低比重で空隙を含む場合にも空隙が全部爆轟性成分の方に存在すると仮定して、その見掛け比重の爆轟特性値を利用し、不活性成分の影響を推測することができる。

2). この場合不活性成分、例えば水は反応途中で衝撃圧縮による温度上昇をきたすが、気化することなく液体のまま存在し、反応完了後圧力低下に伴って気化し、爆発ガスとの平衡に進むものとする。

3). インピーダンス適合法の考えからすれば、衝撃インピーダンスの近接している物質同志の混合系の方が爆轟は安定であり、RDX-H₂O系では純粋な水よりは塩類水溶液の方がより高爆速を与え、かつ安定な爆轟を与えると思われるが、実験結果もその通りになつている。

Table 1 に各種液体を添加したときの爆速値を例として掲げる。

4). 爆薬よりもインピーダンスの大きい不活性液体を使うときを考えると Fig. 6 のようになり、A(C-J点)よりB点を通りC点に入り次いでA点に移るプロセスをとる。この場合爆轟圧は爆薬自体のそれよりも

大きくなるわけで、これは高猛度爆薬を作る一つの方法を暗示する。

5). さらにこの研究を通じて得られた大きい副産物は、高性能爆薬に水または水溶液を加えることにより、危険な圧搾操作なしに、簡単に高密度爆薬を作ることができるということである。これはかなり重要な点であつて、もし水が揮発性で貯蔵性が悪いというならば、不揮発性の液体を使えばよいのであつて、従来超高圧の発生または爆発加工などの研究に爆薬を使いたいと思つてもその危険性のためちゅうちよしている人がかなり多かつたのは事実である。水を15~20%混合すれば感度もかなり低下し、取扱いは楽になる点は非常に便利である。

本研究において実験を援助された東大柳沢剛氏に深甚の謝意を表す。

文 献

- 1) Schmidt, A: Z. S. S. 30, 31 (1935)
- 2) Urbanski, T. & Glass, T: Compt. rend. 209, 558 (1934)
- 3) Duvall, G. E. & Fowles, G. R. in "High Pressure Physics and Chemistry 2" p. 219, Academic Press, 1963
- 4) Kihara, T. & Hikita, T.: Fourth Symp. on Combustion, p. 458 (1953)
- 5) Hikita, T., Yoneda, K. & Asaba, T.: Sixth Symp. on Combustion, p. 379 (1957)
- 6) Walsh, J.M. & Rice, M.H.: J. Chem. Phys. 26, 815 (1957)
- 7) Deal, W.E.: J. Chem. Phys. 27, 796 (1957)
- 8) Coleburn, N. L. & Liddiard, T. R. Jr.: J. Chem. Phys. 44, 1929 (1966)
- 9) Fowler "Response of Metals to High Velocity Deformation" Interscience, N. Y. (1961)
- 10) Campbell, A. W. et. al.: Phys. Fluids, 4, 489 (1961) および Hubbard, H. W. & Johnson, M. H.: J. Appl. Phys. 30, 765 (1959)
- 11) Kamlt, M.J. & Jacobs, S. T.: J. Chem. Phys. 48, 23 (1968)
- 12) 日野熊雄: 工業火薬協会誌, 9, 47 (1948)

A Contribution to the Theory of Detonation of Solid Explosives Containing Inert Liquids

by T. Hikita and S. Fujiwara

It has been widely known that when water or an inert liquid was added to a granular high explosive, the detonation velocity was appreciably increased. However, no reasonable explanation for the role of an inert matter has been given.

This paper proposes a method of calculation of detonation characteristics under the assumption that the inert liquid acts only as a shock transmitter during the reaction time of the main component. Shock-impedance matching technique gives the shock pressures transmitted from the explosive to water layer and vice versa. If the pressure transmitted to the explosive from water exceeds a critical value, the detonation will develop spontaneously. The apparent velocity of detonation will be expressed by

$$D = (1 + \mu)D_1D_2 / (D_2 + \mu D_1)$$

where $\mu = \rho_1 l / \rho_2 l_2$ (Fig. 1), D_1 = detonation velocity of the explosive component, D_2 = shock velocity in water layer. The averaged pressure may be given by

$$\bar{P} = \frac{P_1 + \mu P_2}{1 + \mu}$$

The good coincidence of the calculated values of detonation velocities with the observed ones will be seen in Fig. 4, and 5, the latter figure showing the case of cast TNT-Al system.

From the mechanism proposed, it will be predicted that the inert liquid of higher impedance gives a higher velocity of detonation as well as higher brisance. In fact, this was proved by the experiment shown in Table 1.

(Faculty of Engineering, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo.)