

凝縮系爆轟における管径効果（第2報）

—含水爆薬の実験と解析—

松為宏幸*, 森谷明満**, 米田罔昭*,
浅羽哲郎*, 吉田英治***

前報において求めた凝縮系爆薬の定常条件に関する理論を具体例、〔硝安—MMAN (monomethylamine nitrate) —水の混合物であるスラリー系爆薬〕に適用する。理論計算において初期条件は porosity を考慮した衝撃波圧縮の理論により決定し、反応速度定数をパラメータとして定常爆轟速度の薬径依存性を求めた。一方、実験として内径 1.5—4 cm の範囲で種々の肉厚の鉄管に爆薬を充填しその定常伝播速度、薬径に関する伝播限界、衝撃波曲率等の測定を行った。定常伝播速度 D に関する実験および計算結果の $1/(\Psi R_0)$ に対する依存性はいずれも直線にならず限界薬径および無限大薬径に近い領域で複雑な曲線となることが見出された。速度定数を適切に選べば実験結果と良い一致を示す理論曲線が得られた。

1. 序論

凝縮系爆薬の定常伝播速度の薬径依存性を実験的に求めることは無限大薬径に関する伝播速度を推定する方法として古くから用いられ、また薬径に関する伝播限界の情報も得られる。測定された伝播速度が狭い薬径の範囲でこれの逆数と直線関係になることが多いので理想爆速、 D_∞ を外挿法で決定するのが通例であるがこの整理が正当であるためには $D \sim 1/R_0$ の間の直線関係が保証されていなければならない。無限大薬径の伝播速度は適切な状態方程式を用いれば通常の CJ 理論により計算が可能である。しかし近年産業爆薬として多用されている、硝安系爆薬では外挿により求めた D_∞ の実験値と反応平衡を仮定した CJ 理論値は一致しない場合がある¹⁾。一般に硝安を主成分とする爆薬は反応帯長が長く反応率は低いことが指摘されている²⁾すなわち管の膨張に伴う流線拡大効果が反応帯に大きく影響するため上記の $D \sim 1/R_0$ の簡単な直線

関係が成立しない場合が存在する³⁾。このような場合の理想爆速値 D_∞ の推定、限界薬径の予測、管材質の差異による閉じ込め効率の予測等を正しくかつ比較的手軽に行えるような理論が必要である。最近 Bdzil 等^{4)~6)}は振動法に基く流体力学的定常条件を用いた具体的な爆薬のデトネーションに関する計算を行っているがここで興味の対象としている硝安系爆薬の計算には適していない。本研究においては硝安系含水爆薬の爆轟特性を前報⁷⁾において述べた理論を用いて計算し、かつ、伝播速度の管径依存性、限界薬径および鉄管による閉じ込め効率等に関する実験を実施して両者を比較しようとするものである。特にこの理論では爆薬の直径に対する爆速が大変複雑な依存性を示すことが示されこれと実験結果がどのように対応するかに着目する。

2. 実験方法と結果

使用した含水爆薬の組成は、硝安 (Ammonium nitrate) 31%, MMAN (Monomethylamine nitrate) 56%, 水12%, グアーガム1%の混合物である。他に外割で界面活性剤 (0.3%) および架橋剤 (0.02%) を加えた。比重は界面活性剤により発泡させた泡の量によって制御し管に充填する直前に測定し充填後は密度変化が少くなるよう迅速に起爆実験を実施した。第1図に実験装置の概略を示す。直径 15, 27, 40mm の円筒状爆薬を紙筒または鋼管に充填して作成する。鋼管の内厚は 5—20mm の範囲で 5mm ずつ異なる材料を使用した。爆薬の全長は 40cm で起爆

昭和60年1月8日受理

*東京大学工学部反応化学科
〒113 東京都文京区本郷 7-3-1
TEL 03-812-2111 内線 7296

**日本IBM ㈱
〒160-91 東京都新宿区西新宿 2-6-1
新住友ビル 30F
TEL 03-344-1311 内 2467

***旭化成工業㈱
〒882 延岡市水尻町 304
TEL 0982-21-1217

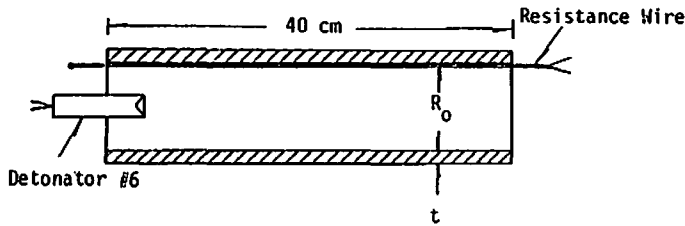


Fig. 1 Experimental Arrangement

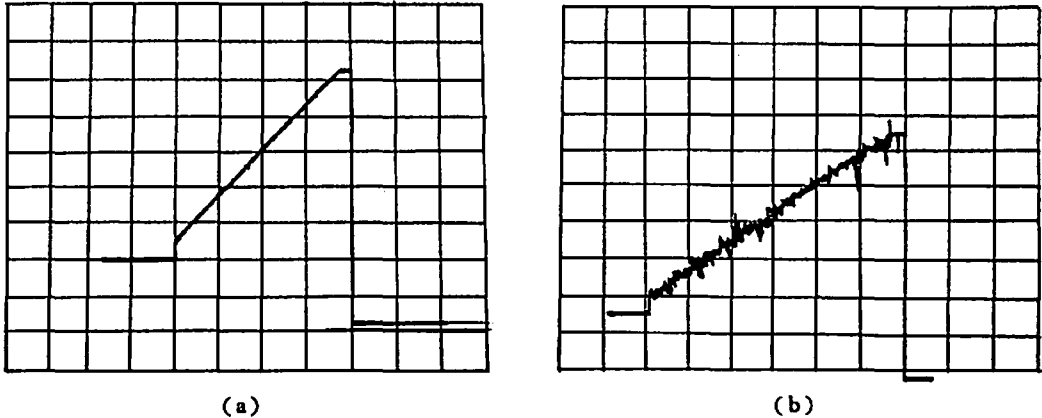


Fig. 2 Examples of Oscilloscope Traces for Measuring The Detonation Velocity
 (The detonation velocity can be decided by the averaged slope of the oscilloscope trace. vertical range : 8 cm/div., sweep time : 20 μ sec/div.)
 a) $\rho_0 = 0.96 \text{ g/cm}^3$, $R_0 = 2 \text{ cm}$, $t = 2.0 \text{ cm}$
 b) $\rho_0 = 0.96 \text{ g/cm}^3$, $R_0 = 0.75 \text{ cm}$, $t = 1.0 \text{ cm}$

は6号雷管によった。

初期密度 $\rho_0 = 0.96 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ における実験を行った。定常爆轟速度の測定は黒田等の方法⁸⁾によった。これは直径 0.08mm のニクロタール線と 0.4mm の銅線をより合せて爆薬の管壁に沿わせて管軸に平行に配置し定電流 100mA を流し爆轟の伝播に伴う短絡によって電気抵抗が変化することに伴う電圧変動を記録することにより爆轟伝播速度を連続的に測定する方法である。Fig. 2 にそのオシロ写真例を示す。図 2-a は内径 4cm 肉厚 5mm の鋼管における測定例で爆轟は全領域にわたって安定かつ定常に伝播していることが示されるが第 2 図-b は内径 1.5cm 肉厚 2mm の鋼管による実験の測定例で爆轟直径が小さくなりまた管の肉厚が薄くなり管材による閉じ込め効果が不十分になると爆速が低下しこのようにオシロ出力は不安定となる。

Fig. 3 に内径 15, 27, 40mm の 3 種類の鋼管を用いた実験により定めた定常爆轟伝播速度 D の肉厚, t に対する依存性を示す。ただし $t = 0$ の測定データは

紙筒による実験値で代用している。 $t = 0$ (裸薬包) の場合直径 40mm の爆薬のみが定常な伝播を示し, 27mm, 15mm ではオシロ出力は不安定かつ断続的となる。鋼管の肉厚が増大するにつれて各内径の爆薬の爆轟伝播速度は増大するが t がある値を超えると伝播速度は一定値に落ち着く。このことは管材料による閉じ込め効果が十分大きくなり衝撃波が管壁を突き抜けることによってもたらされる希薄波が, 伝播の推進力である反応帯には何等影響を及ぼさないことを示している。以降の解析における議論において $t = 0$ と t が十分大きく D が一定値に収束している場合の実験結果のみを考察の対象とする。前報における理論においてその境界条件としてこの両者の中間の場合は取扱っていないからである。

3. 理論解析

ここでは前報⁷⁾において述べた理論に基いて上記爆薬の管径依存性, 管材の閉じ込め効果, 限界管径等を計算する。対象とする爆薬が気泡を含むため 2 相流を考慮した解析を行うことが望ましいが問題を厳密に考

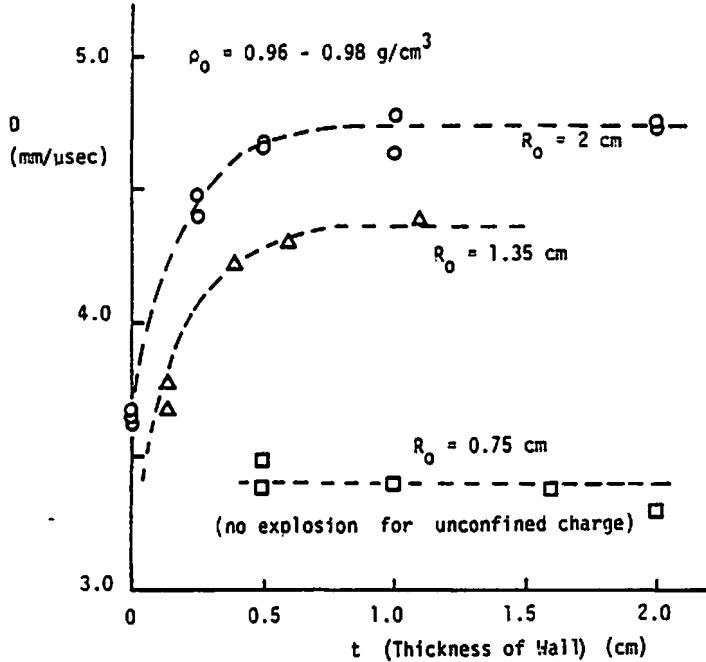


Fig. 3 The effects of the tube wall thickness t and the radius R_0 on the detonation velocity (Tube material: steel)

えると非定常方程式に基く解析を行わなければならない。このような困難を避けるために爆薬は平均化された均一系であると仮定して解析を行う。ただ、初期条件(衝撃波圧縮された未反応爆薬の特性)の計算を行う場合にはその Porosity を考慮しないといけない。ここでは Erkman and Edwards⁹⁾による近似的解析法を採用する。未反応爆薬に関して次の経験的な衝撃波圧縮特性式が適用できるものとする。

$$D = c + su' \quad (1)$$

ここで u' は実験室座標系流速, c , s は物質固有の定数で爆薬を構成している各物質の夫々の測定値から単純に平均加算した値をこの計算では用いることにする。衝撃波直後の含水爆薬の比体積を V , 衝撃波前方の含水爆薬の比体積を V_0 , この含水爆薬の真密度の逆数を V_{00} とする。また、初期比体積, V_0 , V_{00} の各々の爆薬が衝撃波圧縮された時、衝撃波直後の圧力をそれぞれ p_1 , p_1^0 とする。Mie-Grüneisen 式および Rankine-Hugoniot 式より次の関係が得られる。

$$p_1^0 = \frac{c^2 (V_{00} - V)}{[V_{00} - s(V_{00} - V)]^2} \quad (2)$$

$$p_1 = p_1^0 \frac{V_{00} - V - 2V/\Gamma}{V_0 - V - 2V/\Gamma} \quad (3)$$

ここで、 Γ は Mie-Grüneisen パラメータである。連続の式、運動量保存則を用いて p_1 , p_1^0 を (2), (3)

式より消去し整理すると次式が得られる。

$$D^2(1 - V/V_0)(V_0 - V - 2V/\Gamma)[V_{00} - s(V_{00} - V)] - c^2 V_0(V_{00} - V - 2V/\Gamma)(V_{00} - V) = 0 \quad (4)$$

初期条件は仮定された D の値に対して V に関する 4 次式(4)を Newton-Rapson 法により求める。未反応爆薬の密度 $\rho_s (= 1/V)$ が決ると(2), (3)式より p が得られる。これらをエネルギー保存則、

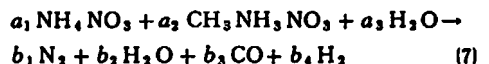
$$e_s = (p/2)(V_0 - V) \quad (5)$$

へ代入すると e_s および温度 $T (= e_s/c_s; c_s$: 反応爆薬の比熱)が決定される。反応生成物の密度 ρ_j は前報において仮定したように p , T が未反応爆薬とそれぞれ等しいから状態方程式、

$$p(1/\rho_0 - b) = RT \quad (6)$$

を用いてその初期値を決定することができる。ここで b は Tanaka の計算¹⁰⁾に適合するように定める。 p , V が衝撃波背後で変動すると b の値も変化するがその値は各積分ステップ毎に再評価を行った。また前報での取扱いで示されるように b の変動はそれ程大きくないので db/dz の項は省略されている。

本解析に於ては次の単一反応系過程、



を仮定し生成物のモル比を変わる係数 $b_1 \sim b_4$ は全

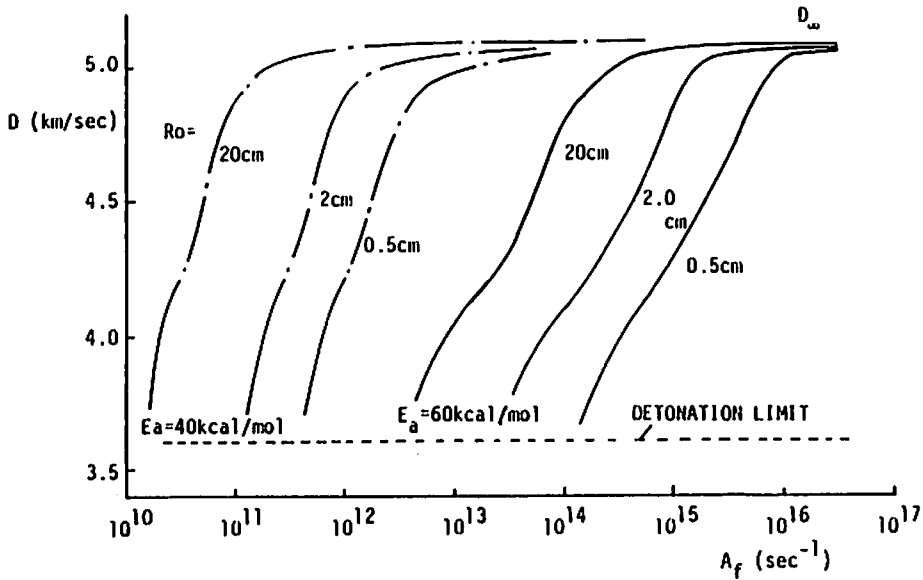


Fig. 4 The calculated results of the velocity of steady detonation
 (— — — ; solutions for $E_a = 40 \text{ kcal/mol}$
 ————— ; solutions for $E_a = 60 \text{ kcal/mol}$)

反応域を通じて一定であるとする。 b の値は各気体の b 値を(6)と拡張木原一疋田式¹⁰⁾が一致するように定めることから決定されるのでこれらを(7)のモル比に従って平均した値を用いる。計算の順序は D を仮定して初期条件を定め、また前報に従って衝撃波曲率 R_c を求める。これらを前報²⁴⁾~²⁵⁾式へ代入し数値積分を行う。積分法としてGear法を採用した。(7)の反応速度定数としては単純アレニウス式、

$$k = A_f \exp(-E_a/RT) \quad (8)$$

を仮定した。この時未反応質量分率 w は、

$$dw/dz = -kw/u \quad (u: \text{流速}) \quad (9)$$

から求める。反応速度が不明であるので本計算においては(8)中の前指数因子 A_f と活性化エネルギー E_a をパラメータとして与えた。計算に用いたその他の数値は次のとおりである。 $\Delta H_s = -5.01 \times 10^6 \text{ J/kg}$, $\Delta H_o = -8.03 \times 10^6 \text{ J/kg}$, $\rho_o = 10^8 \text{ kg/m}^3$, $c = 2140 \text{ m/s}$, $s = 1.926$, $\Gamma = 0.90$, $c_s = 2100 \text{ J/kg K}$, $c_{oo} = 600 \text{ J/kg K}^{\circ}$ 。鋼管に対しては、 $\rho_o' = 7.84 \text{ kg/m}^3$, $c' = 3800 \text{ m/s}$, $s = 1.58$ なる数値を用いた¹¹⁾。

4. 結果と考察

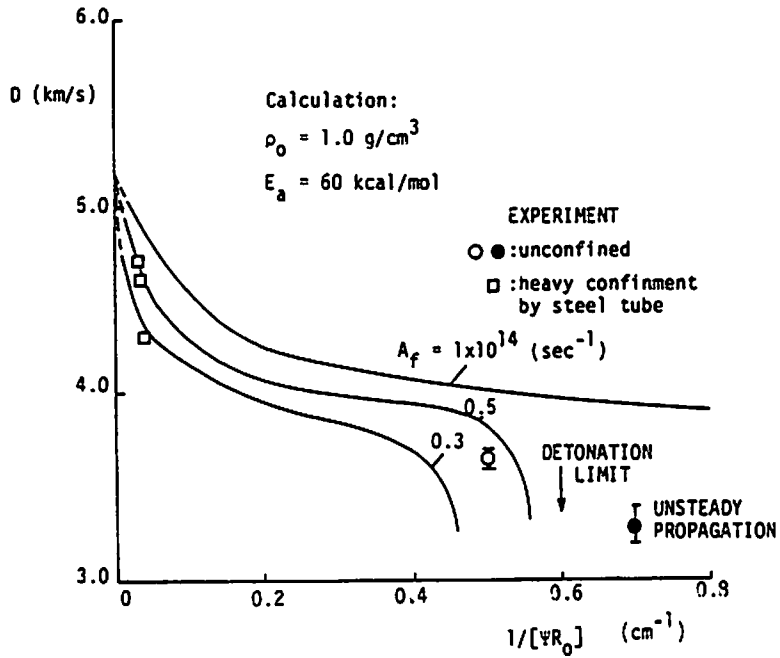
Fig. 4に活性化エネルギー $E_a = 40 \text{ kcal/mol}$, および 60 kcal/mol を仮定し、前指数因子 $A_f = 10^{10} \sim 10^{17} \text{ (sec}^{-1}\text{)}$ の範囲で変えた時の定常伝播速度 D の計算結果を示す。ただし裸薬包とし爆薬半径 $R_o = 0.5 \text{ cm}$, 2 cm , 20 cm の各場合である。まず、いずれの場

合でも反応速度定数が十分大きくなると D の値は一定値(5.16 km/s)へ収束することが示される。これが理想爆速 D_0 を表わす。この値は管壁の有無、爆薬半径の大小、反応速度定数の大小等には無関係である。一方反応速度定数が小さくなると定常伝播速度は反応速度定数の減少に伴ってそれぞれの管径に応じて減少する。反応速度定数が十分小さくなると $D < 3.4 \text{ km/sec}$ においては定常解が見出せなかった。中間の速度定数に関しては薬径が大きくなると D の値は大きくなることがわかる。ここでこれらの解析と実験結果を比較する。鋼管の閉じ込め効果を含めた薬径効果を表わすために前報で導入した閉じ込め効率 Ψ を用いる。これは同一薬径において、

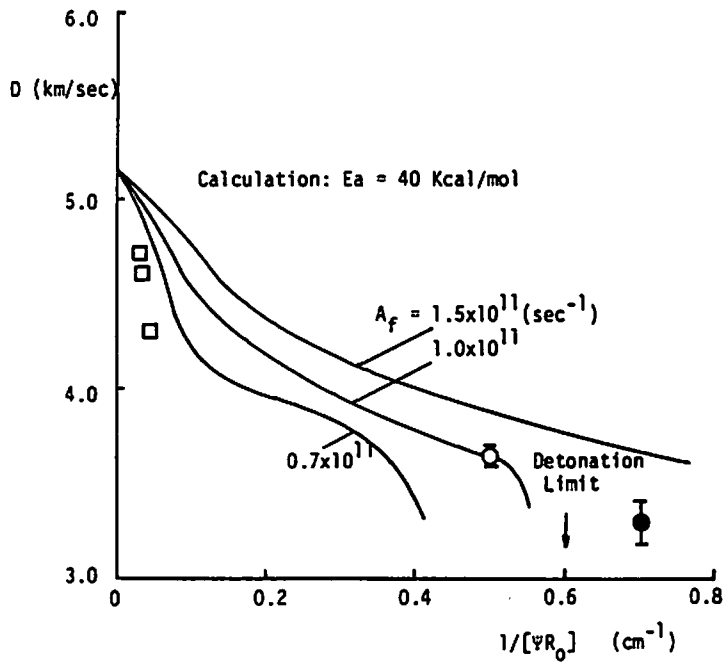
$$\Psi \equiv R_c'/R_c$$

(R_c' : 裸薬の衝撃波曲率, R_c : 鋼管に閉じ込められた時の衝撃波曲率)で定義される量で、前報における考察から ΨR_c が等しい時近似的に同一のCJ条件が与えられることによる。 $E_a = 60 \text{ kcal/mol}$ として D に関する理論計算結果と実験値をFig. 5-aにまとめて示す。同図における両者の比較から $A_f = 0.3 \sim 0.5 \times 10^{14} \text{ (sec}^{-1}\text{)}$ の理論計算が実験値と良い一致を示すことが示されている。なお、 Ψ の測定を試みたが測定精度上の問題があり正確な値が決定できず、Fig. 5における実験点の整理においては計算により求めた Ψ を用いている。

この結果でまず目につくのは D が $1/(\Psi R_o)$ に対



(a)



(b)

Fig. 5 The Dependence of Detonation Velocity on $1/[\Psi R_0]$
 (Experimental Data ; circles : unconfined explosive, square : heavily confined explosive by a steel tube, open symbol : steady detonation, shaded symbol : unsteady propagation)
 a) Calculation for $E_a = 60 \text{ kcal/mol}$, b) Calculation for $E_a = 40 \text{ kcal/mol}$

して直線的な関係にないことが理論、実験共に示されていることである。従って単純に従来、経験的な D_0 値の予測法としてよく用いられている D を $1/R_0$ に対してプロットしてこれを $1/R_0=0$ へ外挿する方法は場合によっては適用できない。Fig. 5 において $1/(\Psi R_0)$ の範囲によってはこのような直線関係が理論曲線においてみられるがその外挿から D_0 値を決定できるのは $1/(\Psi R_0)$ が非常に小さい領域のみである。

第2に理論曲線においては薬径に関する限界が示されこれは実験結果と良い対応を示していることである。ただ実験において限界付近では非常に不安定な伝爆ながら巨視的にみるとその平均値は定常に伝爆を示す場合がありこの現象をこの研究における理論と直接比較することは無理であると考えられる。

全く同様の計算を $E_0=40$ kcal/mol の場合について行いその結果を Fig. 5-b に示す。実験結果と良い一致を示す理論曲線は $E_0=60$ kcal/mol の場合に比べて A_f の値が異なるだけで良く似た傾向を示す。従って実験と理論の比較から A_f , E_0 それぞれを独立に決定することは困難である。

一般化 C-J 条件を用いた解析による定常解では固有解は2種類存在することが知られている¹³⁾。すなわち管径の増大に対して D が増大する解と D が減少する解があり前者の D 値は後者より大きくかつ限界薬径において両者が一致する特性を有する。一般に観測される測定値はその絶対値、管径依存性から前者の固有値に対応すると考えられている。本研究において得られた解も前者に対応しており後者の解は見出されなかった。すなわち、 $D < 3.4$ km/s 以下における固有解を探したが明確に定常解が存在することは確認できなかった。これが積分精度に起因するか否かは不明である。

まとめとして本研究において提示した理論解析法は計算の便宜上、いくつかの近似および仮定を導入しているがこれらは必要に応じて厳密な形へ改良が可能であり凝縮系爆薬の特性の簡単な評価法として使用することができるものと考えられる*。本研究で採り挙げた含水爆薬については計算に必要な反応速度定数、状

* 例えば、本計算において一定比熱を仮定しているがこれは p , T の関数として容易に計算可能である¹⁴⁾。

態方程式や衝撃波圧縮特性に関する諸数値を確定することおよび実験精度の向上等が望まれる。今後の研究方針としてはその他に、この理論を管の閉じ込め効果が小さい薄肉管の場合にも拡張すること、他の均一、非均一爆薬における爆轟特性の計算と実験を行うこと、衝撃波曲率の測定を精度よく行うことによって対称軸上流れに関する一般化 C-J 条件の適用範囲を確認すること等が挙げられる。特に非均一系爆薬に関しては Mader¹⁵⁾ が指適しているように反応帯の構造が均一系のそれと本質的に全く異なる可能性がある。流体力学的に妥当なモデル化を行いなかつ簡単な定常解を得る解析方法を考察することは残された凝縮系爆薬の研究課題の中でも特に重要であると思われる。

本研究は第13回火技奨の助成を得て行われた。ここに心からの感謝の意を表したい。

文 献

- 1) W. E. Gordon, Proceedings of 4th Symp. (Int.) on Detonation, p179 (1966)
- 2) 田中克己, 米田罔昭, 工業火薬協会誌, 38, 185 (1978)
- 3) A. W. Campbell, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 9, 183 (1984)
- 4) J. B. Bdzil, J. Fluid Mech., 108, 195 (1981)
- 5) J. B. Bdzil, J. Chem. Phys., 74, 5694 (1981)
- 6) R. Engelke and J. B. Bdzil, Phys. Fluids, 28, 1210 (1983)
- 7) 松為宏幸, 森谷明満, 米田罔昭, 工業火薬協会誌 46, 61 (1985)
- 8) 黒田英司, 日下部正夫, 工業火薬協会誌, 37, 60 (1976)
- 9) J. O. Erkman and D. J. Edwards, Proceedings of 4th Symp. (Int.) on Detonation p266 (1966)
- 10) 田中克己, 工業火薬協会誌, 43, 239 (1982)
- 11) R. S. Bradley, High Pressure Physics and Chemistry 2, Academic Press (1963)
- 12) S. Tsuge, Astro. Acta, 15, 377 (1970)
- 13) C. L. Mader, Numerical Modeling of Detonation, Univ. Calif. Press (1979)
- 14) J. M. Walsh and R. H. Christian, Phys. Rev., 97, 1544 (1955)

The Effect of Tube Diameter on Steady Detonation in Condensed Explosives (II)

Experiment and Analysis on The Porous Explosive of AN/MMAN/Water Mixture.

by Hiroyuki MATSUI*, Akimitsu MORITANI**, Kuniaki YONEDA*,
Tetsuro ASABA* and Eiji YOSHIDA***

The theory of steady detonation presented in our previous paper is tested for the case of an porous explosive composed of ammonium nitrate/monomethylamine nitrate/water. The effect of porosity is taken into account for initial state at the shock wave compression, but the integration of the fluid dynamic conservation equations is performed for the homogeneous model. The solutions with the assumed Arrhenius parameter are consistent with the experimental results. It is suggested that a confinement parameter, Ψ is useful for evaluation of the characteristics of the explosives.

(*Department of Reaction Chemistry, Faculty of Engineering, University of Tokyo 7-3-1 Bunkyo-ku, Tokyo 113 Japan

**IBM Japan, Ltd, Sumitomo Build. 2-6-1 Nishishinjuku Shinjuku-ku, Tokyo, 113 Japan

***Asahi Chemical Industry Co., Ltd. 304 Mizugiri-cho, Nobcoka, Miyazaki-ken 882 Japan)