

## 瞬間 X 線による爆轟生成物の研究 (1)

吉田正典\*, 田中克己\*\*, 米田罔昭\*, 足田 強\*\*\*

爆轟中の円筒形爆薬を瞬間 X 線を用いて写真撮影し、そのフィルム濃度の変化を数値的に解析することにより爆轟生成物の密度変化を測定した。

実験は裸包のテトリルと塩化ビニル管に装填したスラリー爆薬について行ない、密度分布のほか、C-J 密度、比熱比、C-J 圧、P-v 関係などを求めた。

## 1. 緒言

これまでの爆轟現象の研究において、その興味の中心の一つは、爆轟波直後の生成物の状態、即ち Chapman-Jouget (C-J) 圧、C-J 密度等であった。爆轟はマイクロセカンドオーダーの非常に速い現象であり、しかも超高压を伴うため圧力、密度、温度といった状態量を直接測定することは非常にむづかしい。特に爆轟温度については未だに信頼できる観測手段はないようであるが、幸いなことに衝撃波、爆轟波における圧力、密度等については Rankine-Hugoniot の関係式が成り立つため、圧力、密度を直接測定するかわりに、爆轟波速度や粒子速度を高い精度で測定することにより爆轟波直後の生成物の状態について多くの研究が行なわれてきた。たとえば Deal<sup>1)</sup>は爆薬に金属板を接しておき、その自由面速度を測定することにより、インピーダンス・マッチ法を用いて爆薬の C-J 圧を求めている。また Rivard ら<sup>2)</sup>は瞬間 X 線を用いて爆薬中にあらかじめ埋め込んだ金属箔の動きを観察することにより粒子速度の変化を求め、これから波面背後の密度変化、圧力変化などを求めている。Davis ら<sup>3)</sup>は上記の Deal, Rivard らのインピーダンス・マッチ法と瞬間線法による結果を含めて、四つの異なる実験方法によって求められた Composition B-3 の C-J 圧を比較しているが、最小の測定圧力値は 268 kbar、最大は 312kbar とかなり大きな差異が見られる。

爆轟特性のうち密度  $\rho_{CJ}$ 、圧力  $P_{CJ}$ 、爆速  $D$ 、粒子速度  $u$  の四つの値は質量保存則、運動量保存則の二式により次のようにして求められる。

$$\rho_0 D = \rho_{CJ} (D - u)$$

$$P_{CJ} = \rho_0 D u$$

$\rho_0$  は初期密度である。従ってこれら四つの値のうち二つを測定すればよい。

本研究は、爆轟生成物について状態量の一つである密度の分布を瞬間 X 線法により測定し、別に測定した爆速値を用いて、その結果より高温、高压ガスの状態式や膨張波の伝播等についての知見を得ることを目的としている。爆轟生成物の状態式を計算に用いる場合<sup>4)</sup>これまで木原一正<sup>5)</sup>のような理論的に導き出されたものを用いたが、実際の爆轟生成物がどのような状態にあるのか、詳しいことはあまりよくわかっていない。X 線は爆轟波に擾乱を与えることがなく、しかも生成物の密度によってその吸収が異なるので、密度分布の測定には非常に適していると言える。これまでも Kistiakowsky ら<sup>6)</sup>は連続 X 線を用いて、ガス爆轟において密度がどのように変化するかをフォト・マルチプライヤーを用いて研究している。また凝縮系爆轟の研究においては X 線を定量的に使用している例は少ないようであるが、Freund ら<sup>7)</sup>は爆薬中に金属箔を埋め、箔の位置を変えて二回、同じ状態を瞬間 X 線撮影し、それら二枚の結果を合成することにより、生成物の密度化や粒子速度変化を求めている。また先に述べたように Rivard ら<sup>2)</sup>は生成物の流れを一次元流と仮定し、円筒形爆薬の中心軸に垂直に埋め込んだ何枚かの金属箔の動きから、粒子速度や密度の変化を求め解析を行なっている。しかしこれらの金属箔を用いる実験では流れに擾乱を与えるため、大量の爆薬を必要とするという欠点がある。

筆者らは金属箔を使わずに、瞬間 X 線写真のフィルム濃度変化をコンピューターを用いて数値的に解析することにより爆轟生成物の密度分布を得ることがで

昭和52年1月12日受理

\*東京大学工学部反応化学科 文京区本郷7-3-1

\*\*東京工業試験所 平塚市西八幡1-3-4

\*\*\*福井工業大学 福井市

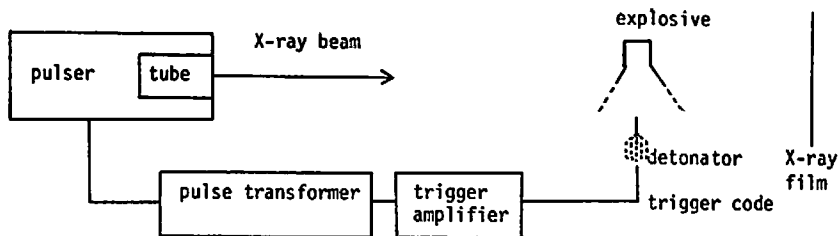


Fig. 1 Schematics of experiments

きたのでその結果を報告する。

## 2. 実験及び解析の方法

### 2.1 実験

直径 2.5~4 cm の円筒形爆薬を雷管あるいはプースターにより起爆し、爆轟波が 5~10cm 進んだところを瞬間 X 線により直接線写真として撮影する。Fig. 1 に実験の概要を示す。X 線フィルムは蛍光増感紙を貼付したカセットに収納され、厚さ 3mm のアルミコウム板 (1~3枚) で爆風圧や飛散物から保護されている。X 線源と爆薬との距離を  $a$  cm, 爆薬とフィルム面との距離を  $b$  cm とすると拡大率:  $(a+b)/a$  は 1.2~1.5 であったが 1.4 以上のものについては良い結果は得られなかった。精度の点から言えば拡大率は 1.1 以下が望ましいが、爆風圧、飛散物、X 線の強度等を考慮して、すべての実験を通じて  $a \approx 180$  cm,  $b \approx 60$  cm とした。

実験はテトリルとスラリー爆薬について行なった。テトリルは初期密度 1.55 (g/cm<sup>3</sup>) でバインダーとして 6% ステアリン酸バリウムを含む。スラリー爆薬は初期密度 1.03 (g/cm<sup>3</sup>) で全長 110mm: 肉厚約 2 mm の塩化ビニル管に装填した。これらの爆薬の諸元は Table 1 の通りである。瞬間 X 線装置は Fexitron 社の field emission 型のものであるが、それぞれの爆薬については仕様の異なる装置を用いたので X 線継続時間、X 線源の直径も合わせて示しておく。

得られた X 線写真を Fig. 2, Fig. 3 に示す。Fig. 3 のスラリー爆薬の写真では、波面後方に塩ビ管の擾乱

Table 1 Flash X-ray experimental conditions

Explosive	tetryl	slurry explosive
Initial density (g/cm <sup>3</sup> )	1.55	1.03
Diameter (cm)	2.48	3.97
Confinement	none	PVC tube
Detonation velocity (cm/ $\mu$ sec)	0.725	0.387
X-ray duration time (usec)	3	20
X-ray source diameter (mm)	3	3

がみられる。このため密度の測定は波面から 1~2cm までが行なうことができなかった。

### 2.2 解析の方法

X 線の吸収は次式によって表わされる。

$$I = I_0 \exp(-\mu_m \rho l) \quad (1)$$

ここで  $I_0$ 、 $I$  はそれぞれ物質透過前、透過後の X 線強度、 $\mu_m$  は質量吸収係数と呼ばれる物質に固有の定数、 $\rho$  は密度、 $l$  は X 線の透過する物質の長さを表わす。

さて爆轟中の円筒形爆薬に瞬間 X 線を照射し、その強度をフィルム濃度として定量する場合を考える。この場合、質量吸収係数は物質を構成している原子の種類及びそれらの重量比さえ同じであれば、物質がどんな状態であろうと、また化合物であろうと混合物であろうと同じ値をとるので、未爆発の部分でも爆轟生成物のどの部分でも (爆轟波面からあまり遠くない範

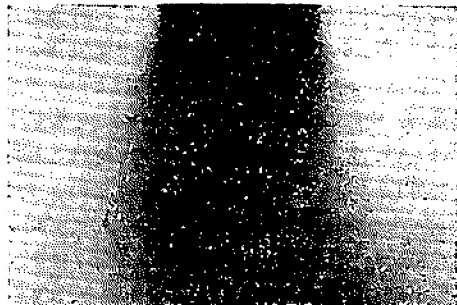


Fig. 2 X-ray photograph of tetryl

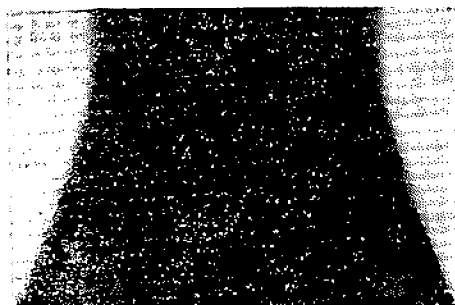


Fig. 3 X-ray photograph of slurry explosive

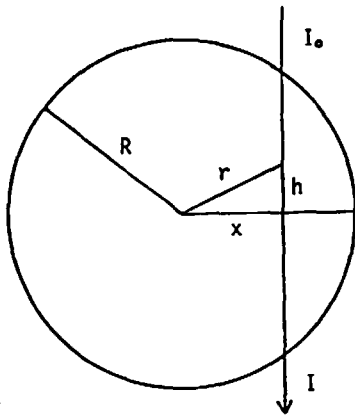


Fig. 4 X-ray absorption by detonation products

囲において)一定であるとみなして差支えない。また(1)式は本来単一波長のX線に対するものであり、本実験のようにX線の波長が広い領域にわたっている場合は、各波長の質量吸収係数を積分した値を用いねばならないが、この値も原子組成、重量比が同じ物質については同じ値をとるので、これを簡単に $\mu_m$ と表わしている。

Fig. 4のように、爆薬の中心軸に垂直な面において爆薬ガスを通じたX線を考える。生成物の密度分布は中心軸に関して対称であるとし、中心軸からの距離 $r$ の関数： $\rho(r)$ とすると、

$$I = I_0 \exp(-\mu_m \int_{-\sqrt{R^2-x^2}}^{\sqrt{R^2-x^2}} \rho(r) dh) \quad (2)$$

となる。

アルミニウムの保護板や空気等によるX線の吸収はどこでもほぼ一定であるから、結局一枚のフィルム内では、フィルム濃度と(2)式の中の $\rho(r)$ 積分値との間に一定の関係が成り立つ。従って予め、密度の積分値のわかっている部分(たとえば、密度が一定である未爆発部分)についてフィルム濃度と密度の積分値との関係を求めておけば、爆薬ガスについても(2)式の中の $\rho(r)$ の積分値がどのように分布しているかを知ることができる。Fig. 4で中心軸から距離 $x$ のところを通過したX線について、この積分値： $g(x)$ が求まったとすると

$$2 \int_0^{\sqrt{R^2-x^2}} \rho(r) dr = g(x) \quad (3)$$

変数変換をして

$$2 \int_x^R \frac{r}{\sqrt{r^2-x^2}} \rho(r) dr = g(x) \quad (4)$$

この積分方程式を数値的に解けば<sup>6)</sup>ある面での密度

分布を求めることができる。

一般に積分方程式は連立一次方程式に帰着することにより数値的に解くことができるが、(4)式の場合は核： $r/\sqrt{r^2-x^2}$ が $r \rightarrow x$ で発散する特異核であるため部分積分をして

$$-2 \int_x^R \sqrt{r^2-x^2} \rho'(r) dr = g(x) \quad (5)$$

より $\rho'(r)$ を求めこれを数値積分して $\rho(r)$ を得ることができる。この解法の誤差は、区間 $[0, R]$ を何等分するかによって決まるが、 $\rho(r)$ にいくつかの関数を仮定し、 $g(x)$ を数値積分により実際に求め、この $g(x)$ より、連立一次方程式を解いて $\rho(r)$ を数値的に逆算し、もとの $\rho(r)$ と比較することにより、推定することができる。分割数が50~100の場合、大体その誤差は0.1%以内におさまるようであるので、解析にあたっては分割数は100と決定した。実際のフィルム解析では読み取り誤差、精度などのため数値解の誤差は約2%程度になる。

この方法以外にも(3)式を数値的に解く方法はいくつかあるが、どの場合でも三角行列型の連立一次方程式を解くことになる。誤差についても、どの方法が特にすぐれているということはないようである。

### 3. 実験結果

#### 3.1 密度分布

X線フィルムの濃度読取には光電光度形を使用した。Fig. 5に濃度曲線の一例を示す(テトリル、起爆後9.6 $\mu$ sec)。これは爆薬波面より1.1mm背後の生成物のフィルム濃度曲線で両端の突起はフィルム上に引いた基準線のものである。この曲線上のいくつかの点(10~20点)でのフィルム濃度を読み取る。これとは別に未爆発部分の濃度曲線から濃度 vs. 密度の積分値の検量線をつくり、これより(4)式の右辺の値をいくつかの $x$ の値 $x_i$ に対して求めるわけである。このようにして得たいくつかの $g(x_i)$ のうち、隣り合う3つの値を放物線で結び、これら放物線の集合をもって最終的に $g(x)$ とし、解析に必要な100等分点での値を求めた。このようにしてFig. 5から求めた密度分布をFig. 6に示す。中心部分(半径0.05cm以内)で急激に密度が高くなっているのはこの数値解法の特徴で、実際に密度が高くなっていることを示すものではない。従って中心密度を求めることはこれらの点を除外し、外挿によらねばならない。このようにして求めた中心密度を波面からの距離に対してプロットするとFig. 7, Fig. 8, のようになる。Fig. 7はテトリルの場合で起爆後9.6 $\mu$ sec後、Fig. 8はスラリー爆薬の場合で起爆後約20 $\mu$ sec後のものである。スラ



Fig. 5 Film density (1.1mm behind the detonation front)

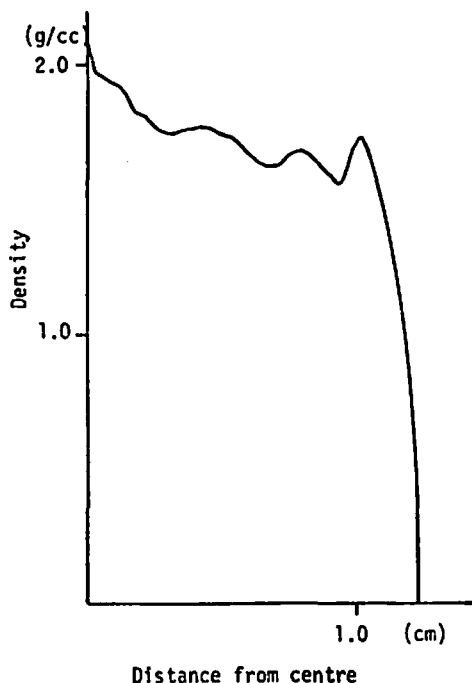


Fig. 6 Density profile of Fig. 5, obtained by solving an integral equation numerically

リー爆薬の場合、塩ビ管の膨張破壊における乱れのため、正しく密度が求まっているのは波面から 1cm までのようである。

テトリルの場合の軸対称二次元的な密度分布を Fig. 9 に示す。波面近傍についてはあまり詳しいことはわからないが、希薄波がどのように進んでいるかがよくわかる。Fig. 8 ではスラリー爆薬に対するデータを最小二乗法で直線にフィットさせてあるが、この直線の傾きは、爆轟波が進行するにつれて水平に近づく。つ

まり希薄波の影響が次第に小さくなるわけであるがこの傾きを爆轟波の進んだ距離に対してプロットしたのが Fig. 10 である。

### 3.2 爆轟波面の密度・圧力

Fig. 7, Fig. 8 から外挿により、波面での密度を知ることができる。また  $Pv^{\gamma} = P_{cJ}v^{\gamma}_{cJ}$  (一定) とすると次の二式により  $\gamma$  及び C-J 圧を求めることができる。

$$\rho_{cJ} = \rho_0 \times \frac{\gamma + 1}{\gamma} \quad (6)$$

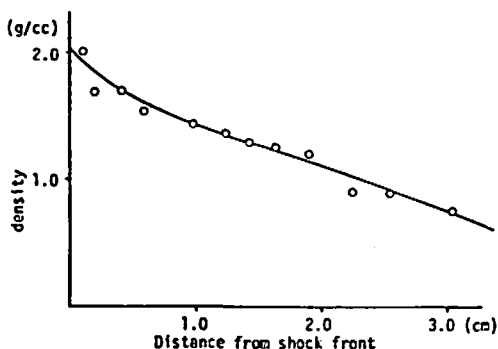


Fig. 7 Density profile of tetryl along charge axis (9.6 μsec after initiation)

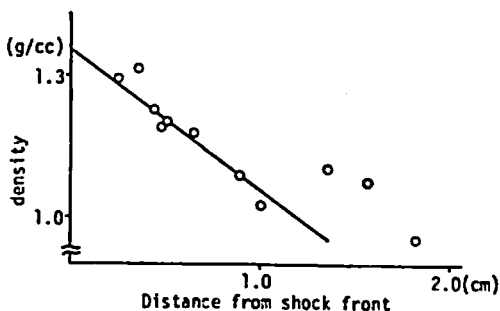


Fig. 8 Density profile of slurry explosive along charge axis (20 μsec after initiation)

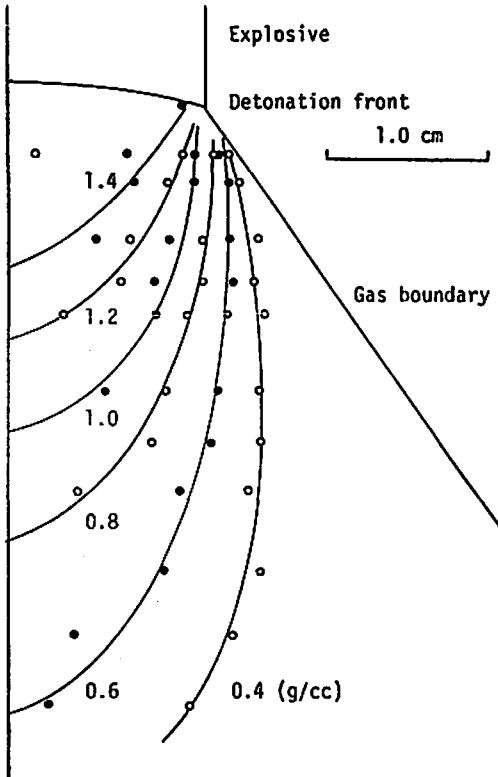


Fig. 9 Two dimensional density field of tetryl (9.6 $\mu$ sec after initiation)

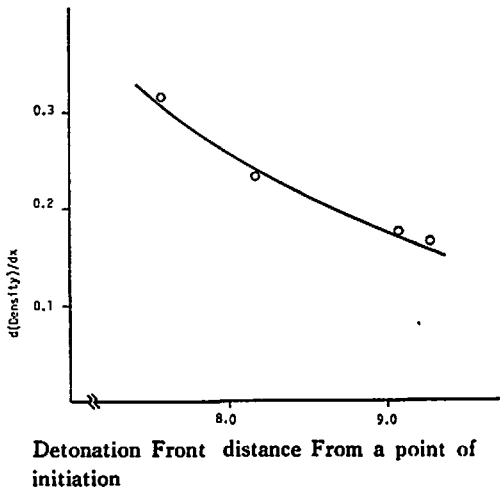


Fig. 10 plots of slope:  $d(\text{density})/dx$  vs. detonation front position

$$P_{CJ} = \frac{\rho_0 D^2}{\gamma + 1} \quad (7)$$

ここで $\rho$ は比体積、 $\gamma$ は比熱比である。

結果を Table 2 に示す。

テトリルの場合、採包であるので、爆轟生成物の拡がり角 ( $\varphi^\circ$ ) からも  $\gamma$ ,  $P_{CJ}$  を求めることができる。

Table 2 C—J conditions measured by Flash X-ray method

Explosive	tetryl	slurry explosive
C-J density(g/cm <sup>3</sup> )	2.02	1.34
$\gamma$	3.30	3.32
C-J pressure(kbar)	190	36

今  $\alpha = \varphi/90^\circ$  とすると次の式が成り立つ。

$$\gamma = \frac{(\alpha+1)^2+1}{(\alpha+1)^2-1} \quad (8)$$

この  $\gamma$  を(7)式に代入して  $P_{CJ}$  を求める。このようにして求めた比熱比は  $3.18 \pm 0.03$ , C-J 圧は  $195 \pm 1$  kbar であった。Table 2 の結果良い一致を示している。また Dremin ら<sup>9)</sup>の電磁箔法による実測爆圧  $200 \pm 10$  kbar ともよい一致を示す。

### 3.3 誤差について

誤差を生じさせる要因についてはいろいろ考えられるが、最も影響の大きいものは次の二つである。

- ① X線源が点源でないことによる誤差
- ② 現像ムラによる誤差

①の誤差は爆轟波面において最大となる。X線源とフィルムとの距離を大きくとること、爆薬とフィルムを近づけることにより解決できることであるが、これらには限度がある。今回の実験の場合、拡大率は1.3前後、X線源の直径は約3mmであるので、爆轟波面での生成物の密度を直接精度よく決定するのはむづかしく、外挿に依らねばならない。

②については、注意深く現像を行えば、ムラのないフィルムを得ることはそれほどむづかしくはないが十分な量の現像液を用いて、細心の注意を払う必要がある。

以上述べたものの他に、誤差の原因として次のようなものが考えられる。

- ・ X線ビームに対する爆薬、フィルムの垂直性
- ・ X線が平行なビームでないことによる誤差 (解析にあたってはX線は平行に照射されていると仮定している。)
- ・ X線の散乱
- ・ 蛍光増感紙の粒子ムラ (蛍光増感紙の粒子はフィルム粒子よりはるかに大きい)
- ・ 光電光度計の性能 (濃度分解能・測定面積等)
- ・ 積分方程式と数値的に解く段階での誤差

以上の要因をすべて含めて、本実験の精度はおおよそ  $\pm 3\%$  であろうと思われる。

### 4. 実験結果の流体力学解析

密度分布が精度よく求められたテトリルについて、

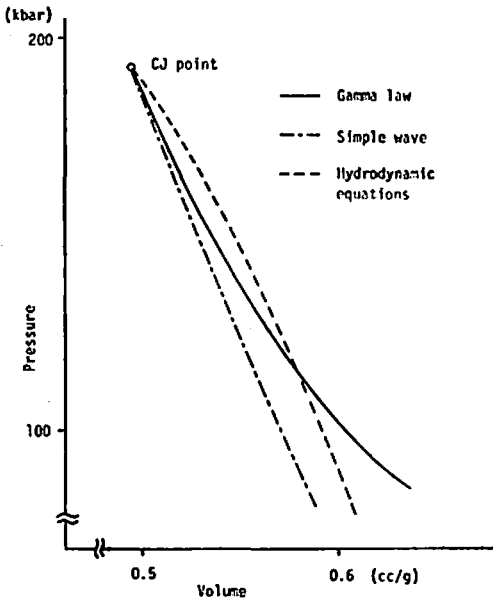


Fig. 11  $P-v$  diagram of detonation product of tetryl

次の二つの方法により  $P-v$  関係を求めた。

- ① 特性曲線の理論により、ある瞬間の密度分布 (Fig. 7) のみから  $P-v$  関係を求める。
- ② 密度分布の時間変化から、流体式を数値的に解くことにより圧力変化を求める。

いずれの場合も側面からの希薄波は考慮に入れないので、一次元的な解析となる。

①の方法は特性曲線の単純波の理論にもとづくもので次の三式より  $P-v$  関係を求める。

$$u + a = \frac{(x_0 - \Delta x)D}{x_0}$$

$$\frac{\partial u}{\partial \rho} = \frac{a}{\rho}$$

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = a^2$$

ただし、 $x_0$  は爆轟波の進んだ距離、 $u$ 、 $a$  は波面から  $\Delta x$  背後での粒子速度、音速である。初期値には 3.2 節で得たものを用いた。

②の方法は、密度の位置変化、時間変化より、次の二式から粒子速度の位置変化、時間変化を求めることにより、圧力の位置変化、圧力-密度の関係を求める方法である。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = 0$$

初期値は①と同じものを用いた。

Fig.11 にこのようにして求めた  $P-v$  関係を示す。比較のために、 $Pv^r = P_{CJ} v_{CJ}^r$  (一定) の曲線も共に示す。ただしこれらの方法はあくまで側面からの希薄波の影響を考慮に入れずに、一次元的解析を行なっているので、本実験のように薬径の小さいものについて精度よく  $P-v$  関係を求めるのはむづかしい。

## 5. 謝 辞

本研究を行なうにあたって、実験上いろいろな面で御指導、御協力いただいた通産省公害資源研究所の吉田正氏、田中雅夫氏、松本栄氏、熊本大学工学部の藤田昌大氏、永山邦仁氏、河野博博氏、以上の方々から感謝の意を表します。

## 6. 文 献

- 1) W. E. Deal: J. C. P., 27, 796 (1957)
- 2) W. C. Rivard, D. Venable, W. Fickett, and W. C. Davis: 5th Symposium on Detonation, preprint, pp.1 (1970)
- 3) W. C. Davis and D. Venable: *ibid.*, pp.9
- 4) 田中克己, 疋田強: 工業火薬, 36, 210 (1975)
- 5) Kihara, Hikita: 4th Symposium on Combustion, 458 (1953)
- 6) G. B. Kistiakowsky and P. H. Kydd: J. C. P., 25, 824 (1956)
- 7) H. U. Freund and W. Geiger: Acta Astronautica, 1, 405 (1974)
- 8) 日高孝次: "積分方程式論", 河出書房 (1941)
- 9) Dremin et al: "Detonation Waves in Condensed Media", Acad. Nauk. (1970)

## The study on detonation in high explosives by flash X-Ray method (I)

by Masatake Yoshida\*, Katsumi Tanaka\*\*, Kuniaki Yoneda\*, Tsutomu Hikita\*\*\*

The measurements of pressure-specific volume relation in detonation products have been performed using flash X-ray radiograph in which the configurations of the density of detonation products in cylindrical high explosive charges have been solved numerically from the measurements of the film density.

The Chapman-Jouget properties of pressure, density, specific volume, specific heat ratio and pressure-volume equation of state were obtained from the experiments of the unconfined high explosive-charge and the water gel-charge confined by polyvinyl chloride tube.

(\*Faculty of Engineering, University of Tokyo, Tokyo

\*\*National Chemical Laboratory for Industry, Hiratsuka, Kanagawa

\*\*\*Fukui Institute of Technology, Fukui)

# 化学抄報

KAGAKU SHOHO

## 最新の化学情報を手早く知るには!!

化学情報協議会は、27学協会を中心に設立された団体で、化学情報の円滑な流通を目的としています。

抄報誌は、月2回、各冊平均130ページ年24冊発行です。

購読料は、年間36,000円(送料共)で加盟学協会所属の団体会員は30,000円、個人会員(自宅宛送本に限る)は18,000円に割引の制度があります。

日本で発行されている化学関係主要誌約90誌の抄録を集め、Chemical Abstractsの80分類に従った分類索引をつけ、毎月2回速報します。

読者は、所属する専門分野の報文を選んで、内容の要点を知ることができます。「化学総覧」が週及調査用であるのに対し、「化学抄報」は、現状追従調査用資料です。購読には下記へ申込書を請求して下さい。

(会員入会申込先)  
〒113 東京都文京区弥生2-4-16  
学会センタービル内 Tel.03(815)1903

(事務局) 〒101 東京都千代田区神田駿河台1-5  
(社)日本化学会会付 Tel.03(292)6161

社団法人 化学情報協議会