

アジ化鉛の水中衝撃圧

生沼仙三*, 田中一三*, 椎野和夫*

前報試作の大型ホルダーにビエソ素子を装着し、微小アジ化鉛ベレットの水中衝撃圧を測定した。そして粒子速度から求めた波頭圧力と比較検討した。

1. 緒言

筆者らは、最近、尿路結石の爆薬破砕に関する研究^{1),2),3),4)}を行っており、その一環として微小爆薬の示す爆発衝撃波特性を検討することにした。この場合、空中衝撃波についてはすでに報告⁵⁾したが、水中衝撃波については、波の持続時間が短いため、常法のビエソ素子で測定してもノイズのために正確な値が得られなかった。そこで前報⁶⁾では、そのノイズ発生の原因と防止について検討し、ビエソ素子を大型のホルダーに固定すればノイズの発生は少なくなることを知った。本報はその方法で圧力測定を行なったものである。

しかし、こうして得られる圧力は、前報で述べたように反射圧を示し、自由水中の圧力を示さないことが予想される。得られた圧力値が反射圧であるかどうかをたしかめるためには、ビエソ測圧以外の方法による圧力測定値と比較することが望ましい。空中の場合には⁷⁾、衝撃波伝播速度から求めた圧力値によって検討したが、水中の場合は、衝撃波伝播速度はよほど圧力値が高くなるとほとんど変化しない。そこで今回は水の粒子速度による測定値と比較した。

2. ビエソ素子による圧力測定

2.1 使用爆薬

微小爆薬としては、アジ化鉛をベレット状にしたものを用いた。その製法はすでに報告⁸⁾してあるので、その概要を示す。

すなわち、アジ化鉛はアジ化ソーダと硝酸鉛から製造し、ボパールをバインダーとして使い、円板状に成形した。そして5%アラビヤゴム水溶液をごくわずか使って、発火用の白金ブリッジをその成形物2個ではさむようにして接合した。その最大薬量は82mg、最小薬量は17mgである。実験に際しては、その表面をm・p 72℃のパラフィンで被覆し、防水した。

圧力校正用の爆薬としては、日本油脂KK製の6号電気雷管を用いた。

2.2 測定方法

圧力測定に用いたビエソ素子は、キスラー社製の607A型であり、これは前報⁶⁾で試作した大型ホルダー(Type F)に装着して用いた。その際使用のチャージアンプは、同社製の、549A型高周波フィルター内蔵の504E型である。デジタルメモリーは、岩通電子KK製のDM-703型であり、オシロスコープは、同社製のSS-4511型である。

圧力測定に際し、アジ化鉛ベレットは、その平らな面を、電気雷管はその底部をビエソ面に向けて置いた。

2.3 圧力測定

水中圧力波形を、オシロスコープで記録した一例をFig. 1に示す。図において、10~14 μ secを周期とする振動は、前報でも述べたようにビエソ素子の固有振動で生じたものと考えられる。その波形の様子、このノイズをどう処理するかによってだいぶ違ってくるが、最初の山のピークと、以下の各山の midpoint を結ぶような波形であるとする、一般の水中衝撃波の圧力波

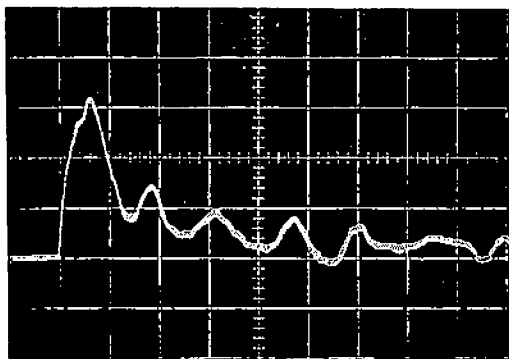


Fig. 1 Example of shock wave profile.

Pb (N₃)₂ : 620mg

d : 20cm

scale : 40kg/cm²/div., 10 μ sec/div.

昭和54年4月6日受理

*東京工業大学 〒254 平塚市西八幡1-3-4

形と同様、 $P(t) = P_m e^{t/\theta}$ 式で表わされる波形となる。ここに P_m は測定で得られた波頭圧力、 θ は時定数、 t は時間である。このようにして Fig. 1 の圧力波形から時定数を求めると、薬量 600mg 程度のアジ化鉛の時定数は $14 \sim 15 \mu \text{sec}$ となる。

一般に水中衝撃波の自由水中における（反射のない状態）波頭圧力 P_s は、薬量 W と距離 d との間に、

$$P_s = K \left(\frac{\sqrt{W}}{d} \right)^n \quad (1)$$

の形の実験式が適用され、TNT、ペンスリット等の高性能爆薬については、 P_s 、 W 、 d の単位を kg/cm^2 、 kg 、 m にとったとき、

$$P_s = 520 \left(\frac{\sqrt{W}}{d} \right)^{1.18} \quad (2)$$

が知られている⁷⁾。ここで測定したアジ化鉛についても同様な実験式にあてはめるため、 P_m と $(W^{1/2}/d)$ の両対数グラフにプロットしてみると、Fig. 2 が得ら

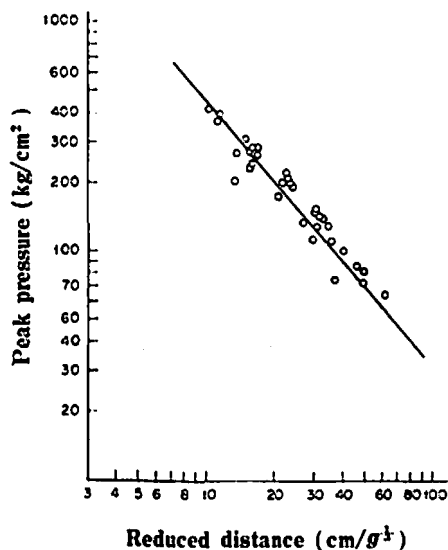


Fig. 2 Peak pressure vs. scaled distance.

れた。図中の直線は、最小 2 乗法による直線近似で求めたものであるが、(1)式にあてはめると、

$$P_m = 451 \left(\frac{\sqrt{W}}{d} \right)^{1.16} \quad (3)$$

が得られた。

こうして得られた測定値 P_m が、自由水中での P_s とどのような関係にあるかを知るため、本文ではビエソ測圧と別に、水の粒子速度の測定を行なって、それから換算される圧力値と比較した。この比較には電気雷管を供試爆薬としたので、電気雷管についても、上と同じ方法でビエソ測圧を行なった。その結果は、次節に粒子速度の測定からの圧力値と比較して述べる。

3. 水の粒子速度による圧力測定

3.1 粒子速度の測定法

粒子速度は、普通、自由面速度から求められる。このような測定例には、爆薬の真上の水面上に極板を設置し、極板と水面間の静電容量の変化から粒子速度を求める方法⁸⁾ などがある。筆者らはピンコンタクト法でそれを求めることにした。予備実験では、薄いスズはくを水面に置き、爆発でそれが飛び出す速度を測定してみた。しかし再現性のある値が得られなかったので、スズはくをとり除き、水面の直接接点でも十分検出できるような回路を用いて測定した。

測定ピンには、絹針 7 号（長さ 40.9mm、太さ 0.56mm）を用いた。これらのピンは Fig. 3 のようにメタアクリル板に固定した。そのピン長の差 (ϕ) は、精度 $\pm 0.0025\text{mm}$ のマイクロテスターで求めた。

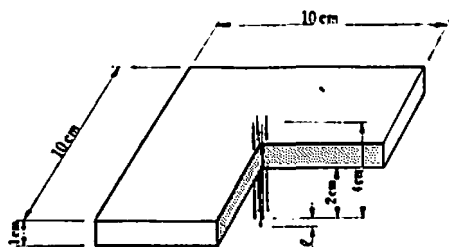


Fig. 3 Installation Pins.

Fig. 4 に、粒子速度の測定配置図を示した。水槽（ $90 \times 90 \times 90\text{cm}$ ）は風などで水面が変化しないように室内に設置した。使用爆薬は 6 等電気雷管であり、こ

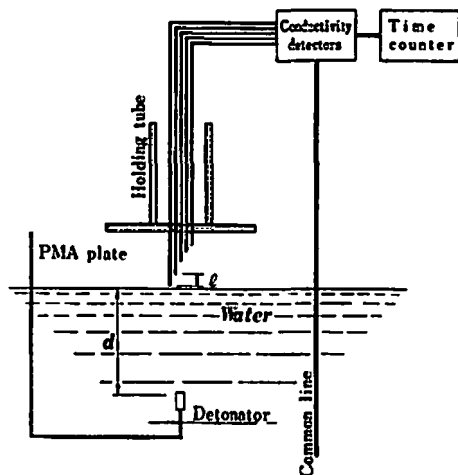


Fig. 4 Schematic diagram of the instrument for measurement of particle velocity.

れは所定距離 d の水中に管体の底が上を向くように置いた。測定ピンは、その真上の水面上に置いたが、最

も長いピンの先端は水面上 0.1mm 以内にあるようにし、これへの水の接触信号をトリガーに用いた。

各ピンに、Fig. 5 の回路をピンの数だけ接続した。この回路は、水中爆発のガス球の検出に用いるもの⁹⁾と同じである。図は入力側の端子の間を短絡すると、

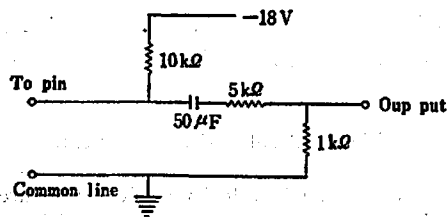


Fig. 5 Electric circuit of water contact detector.

出力側にはプラス電圧を発生する。図の R は $10k\Omega$ の高抵抗を用いるので、入力側の接触抵抗がかなり大きくても十分な出力電圧がある。測定時には、回路のアース側に長い銅線をつなぎ、共通ラインとして水中に垂らした。回路の出力信号の再現性をたしかめたあと、実際の測定に当っては、Fig. 5 の出力電圧をタイムカウンターに入れ、最も水面に返りピンから他の各ピンまでの所要時間を測定し、ピン長の差 (d) から速度を計算した。使用したカウンターは、東工試製の最大 $9999\mu\text{sec}$ 、最小 $0.1\mu\text{sec}$ まで測定できる 6 チャンネルのものである。

3.2 粒子速度の測定結果

Fig. 5 の回路の出力波形をオシロスコープで観測すると Fig. 6 のようになった。図は 0.479mm 離れた 2 本のピンによる出力信号の立上り部分を 2 現象記録としたものである。掃引速度は $20\mu\text{sec/div.}$ であるが、

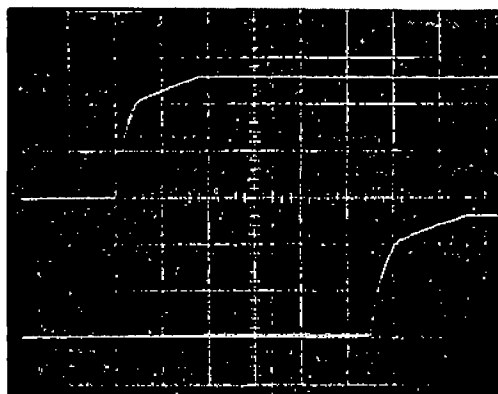


Fig. 6 An example of oscillogram.
Sweep velocity: $20\mu\text{sec/div.}$

水が接触したときの立上りはかなり早く、ピンの距離によってほとんど差のないことがわかる。したがってこの出力波形をタイムカウンターに入れたときの誤差は、たかだか $10\mu\text{sec}$ 以下と思われた。

水の速度は、水面から離れるにしたがって減衰するおそれがある。ここで必要なのは初速度であるから、それを正しく求めるには、減衰のはじまる距離を知っておく必要がある。Fig. 7 は雷管から水面までの距離 d をいろいろ変えて、ピンの高さ h と水の到達時間の関係をプロットした結果である。図からわかるように、 d が小さくて衝撃波が強い場合は、水面から比較的長い距離を水は等速で動いているが、 d が大きくなるにしたがって等速で動く距離は短くなっている。この水面に近い等速の領域で、水の速度を求めることにした。

Fig. 7 の右は、ピンを水面から 1mm 以内に配置したときの測定結果である。ここで d が 10cm と 15cm

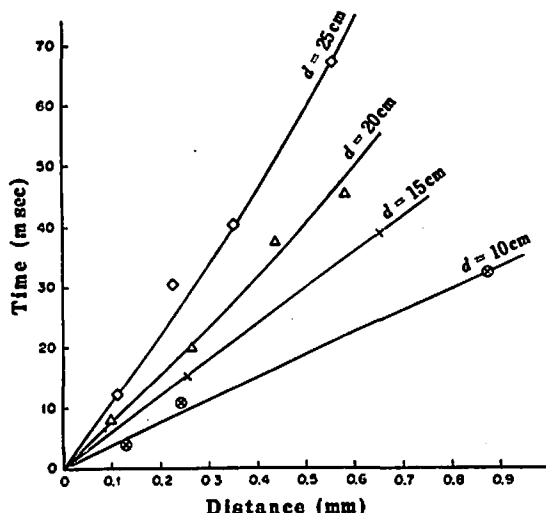
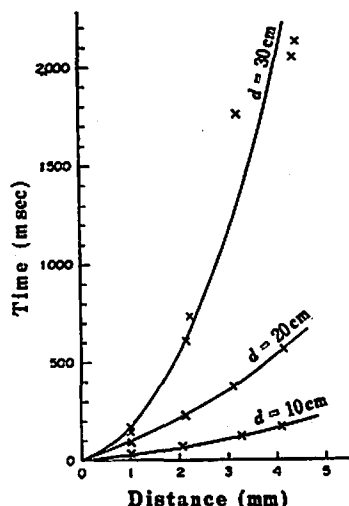


Fig. 7 Arrival time vs. distance.

の場合は距離0.7~1mmまで、 d が20cmおよび25cmの場合は距離0.25mmおよび0.2mmまで直線関係があるとしてその速度を求めた。Fig. 8にそれを示す。

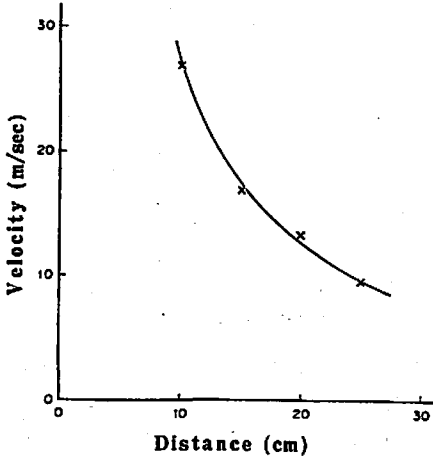


Fig. 8 Particle velocity vs. distance.

固体や液体中を伝播した衝撃波が自由水中で反射するとき、自由面の動く速度は本来の粒子速度の2倍となることはよく知られている。この実験でも当初は測定値が自由面速度となることを予想して行なったが、実際に得られた数値は、粒子速度そのものとした方が妥当であることがわかった。

この測定で、自由面速度が検出されない理由は、次のように考えられる。衝撃波が自由面に達したとき、媒体の速度が2倍になるのは、自由面で発生した引張波のためである。しかし水の場合は引張波が生ずると、水は引きちぎられて飛沫となってしまふ。この現象は、実際に水中爆発の水面の観察からも知ることができる。この飛沫の速度を測ることができれば、それは自由面速度を持っているであろう。しかし Fig. 5の回路では、ピンと水槽全体の水との間の導通を検出する形になっているので、水面から離れた飛沫がピンに接触しても導通を生じないはずである。

飛沫の発生は衝撃波に水面に達して生じた引張波の残存張力がゼロになるまで続くが、この測定ではピンが水面近くにあるため、その途中で水の粒子速度が得られることになる。

3.3 粒子速度から圧力の算出

上記粒子速度に対応する波頭圧力は、次のようにして求めた。

衝撃波速度を U_s 、粒子速度を U_p とし、水の密度を ρ とすると、これらと波頭圧力 P_s との間には、 $P = \rho U_s U_p$ の関係が存在する。したがって波頭圧力は、 ρ 、 U_s 、 U_p をそれぞれ測定すれば求められるが、

U_s と U_p の間には C を音速として、 $U_s = C + KU_p$ の関係があることが知られている。水の場合、 K はほとんど2.0になる⁷⁾。これを上式に代入すると下式が得られる。

$$P = \rho(C + 2.0U_p)U_p \quad (4)$$

したがって、波頭圧力は粒子速度から求められる。

Table 1は、このようにして波頭圧力を求めたものである。この圧力値は、反射のない自由水中での P_s に相当する。

Table. 1 Results of measurement.

Distance (cm)	Particle velocity (m/sec)	Peak Pressure (kg/cm)
10	26.8	406
15	16.9	253
20	13.3	198
25	9.5	141

3.4 ピエゾ測定圧力値の検討

電気雷管の爆発で生じた水中衝撃波について、ピエゾ圧力測定装置と粒子速度から得た圧力値を Fig. 9に示した。直線 (b) は雷管から距離 d の点での直接的な測定のピーク値、(a) は水面から深さ d

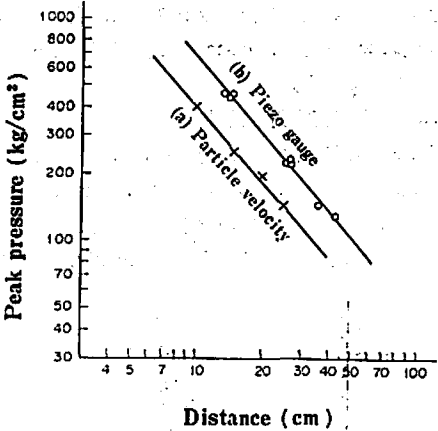


Fig. 9 Peak pressure vs. distance.

で爆発させたときの水面の粒子速度から、前述の計算で求めたものである。これらの直線は、圧力 P 、距離 d の単位を kg/cm^2 、 dm 、にとったとき下式で表わされる。

ピエゾ圧力測定装置によるもの

$$P_m = 670 \left(\frac{1}{d} \right)^{1.15} \quad (5)$$

粒子速度によるもの

$$P_s = 406 \left(\frac{1}{d} \right)^{1.15} \quad (6)$$

雷管の装薬量は、ガスエネルギーの測定値からみて、高性能爆薬の0.5gに相当¹⁰⁾するので、 $W=0.5g$ として、(5)、(6)式を $(\sqrt[3]{W}/d)$ の関数で表わすと、それぞれ、

$$P_m = 874 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{d} \right)^{1.13} \quad (7)$$

$$P_s = 527 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{d} \right)^{1.13} \quad (8)$$

となり、(8)式は高性能爆薬についての水中衝撃波圧の実験式⁷⁾ (2)式と一致する。このことは、粒子速度から求めた圧力値 P_s が、いわゆる衝撃波の静圧を衰わしており、ビエソ測定 の P_m は、それより高い反射圧を示していると考えられる。

(7)式と(8)式では、 $(\sqrt[3]{W}/d)^n$ の指数にわずかの違いがあるが、 $d/\sqrt[3]{W} = 1\text{m/kg}^{1/3}$ (Fig. 9 の横軸の単位では $10\text{cm/g}^{1/3}$) の付近にあるデータについてはこの差は問題にならない。そこで簡単のために n の差を無視して計算すると、 $P_m/P_s = 1.65$ が得られる。入射圧と反射圧の比が、水とビエソ受圧面 (ステンレス) のインピーダンスからきまるとすると、数値的にはこの比は1.9になるはずである。上の値はこれよりやや小さいが、ビエソ測圧でのピーク値 P_m は、おそらく反射圧とみなすのが妥当であろう。

4. 結果と考察

前節の電気雷管について得た P_m/P_s の関係は、若干の誤差を含むにせよ、同様な条件で測定した他の爆薬にも同じと考えられる。アジ化鉛のビエソ測圧による実験式(3)にこの関係を用いて、自由水中での波頭圧力 P_s に換算すると、

$$P_s = 273 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{d} \right)^{1.13} \quad (9)$$

が得られた。ここに P_s , W , d の単位は kg/cm^2 , kg , m である。

上式の273という数値は、2度の測定を基にものであまり精度のよいものではないかもしれない。 P_m を求める際の Fig. 2 のばらつき、そして P_m/P_s を求めた Fig. 7 および Fig. 9 のばらつきが問題になる。この点を爆発衝撃波のスケール法則から考察すると、次のようになった。

アジ化鉛の爆風圧の報告⁹⁾ で述べたように、現象が爆発エネルギー E に依存するスケール法則を満足するとすれば、爆薬の種類が異なるときの(1)式は、薬量 W をエネルギー E で置き換えたものになる。したがって爆薬の単位薬量あたりのエネルギーを q とすると、

$$P_s = K \left(\frac{\sqrt[3]{qW}}{d} \right)^n \quad (10)$$

としたときの K は、 n が同一である限りスケール法則を満足するすべての爆薬について一定値となるであろう。実際には n の値は前節の測定値がそうであったように若干の差異がある。これは爆薬の種類による差というより、現在の段階では精度による部分が多い。

ここで簡単のために、 n の差を無視してすべて1.13としてみる。高性能爆薬とアジ化鉛の、単位薬量あたりのエネルギーをそれぞれ q_x および q_A とし、(2)式と(9)式がどちらも同じ00式から生じたものとする、 $q_A/q_x = (273/520)^{1/1.13} \approx 1/5$ とならねばならない。

q の値に爆発熱を用いると、前の報告で述べたように、高性能爆薬の値は $1200 \sim 1500 \text{kcal/g}$ であり、それに対してアジ化鉛は、酸素のない状態での測定値は 380cal/g であった。後者は前者の $1/3 \sim 1/4$ であり、ここに得られた $1/5$ というのはやや小さい。

この差は測定誤差の範囲内にあるといえる。つまり圧力が10%異なると、この計算では $(3/1.13)$ 乗されるので約25%の違いとなるように、圧力のわずかな違いがエネルギー換算では大きくなる。逆にアジ化鉛のエネルギーを高性能爆薬の $1/4$ を仮定して(2)式をもとにしてアジ化鉛の P_s を求めると(9)式の係数が308になる。実際に得られた273は、これより10%ほど小さいのに過ぎない。最初の Fig. 2 の測定値のばらつきをみて、このていどの誤差はあり得ると考えられる。

5. 結 言

以上のように本研究においては、まず前報試作の大型ホルダーにビンダ素子を装着し、微小のアジ化鉛ペレットの水中衝撃波を測定した。得られた圧力波形は、 $P(t) = P_m e^{-t/\tau}$ で表わされる波形であり、その波頭圧力 P_m と換算距離 $\sqrt[3]{W}/d$ の間には下式の関係があることがわかった。

$$P_m = 451 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{d} \right)^{1.13}$$

ここに P_m , W , d の単位は kg/cm^2 , kg , m である。

次に6等電気雷管を用いて、ピンコンタクト法を応用した粒子速度の測定を行ない、ビエソ圧力測定装置で得られる波頭圧力と比較検討した。その結果、ビエソ圧力測定装置と、粒子速度からの圧力値についてそれぞれ下記の関係式が得られた。

ビエソによるもの

$$P_m = 670 \left(\frac{1}{d} \right)^{1.13}$$

粒子速度によるもの

$$P_s = 406 \left(\frac{1}{d} \right)^{1.13}$$

ここに P_m または P_s , d の単位は kg/cm^2 , dm である。このようにビエゾ圧力測定装置から得られる波頭圧力は、粒子速度から求まる波頭圧力より1.65倍高い圧力値を示した。これはビエゾ圧力測定装置の方がそれだけ高い圧力を感知していることを示すものであり、そのような圧力は、ビエゾ圧力測定装置の受圧面における反射圧であることが推測された。

以上のことから、上記アジ化鉛ペレットの圧力式を自由水中の波頭圧力を示す式になおし、下式を得た。

$$P_s = 273 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{d} \right)^{1.18}$$

ここに P_s , W , d の単位は kg/cm^3 , kg , m である。

一方、爆薬の爆発熱を基準として、フケール法則から上の形の実験式の係数を推定すると、上の値より10%ほど大きくなるべきことを知った。これは測定精度からみて実験誤差の範囲内にあると同時に、得られた実験式もこの誤差を含むと思われる。

付記

粒子速度の測定に際しては、科学警察研究所の中村順氏の協力を得た。ここに厚く感謝する。

文 献

- 1) 渡辺(決), 生沼, 日泌尿会誌, 68, 243 (1977)
- 2) 村田, 渡辺(決), 高橋, 渡辺(康), 古江, 生沼, 同誌, 68, 249 (1977)
- 3) 生沼, 東工誌報告, 73, 205 (1978)
- 4) 生沼, 金子, 古江, 渡辺(決), 工業火薬, 39, 270 (1978)
- 5) 生沼, 椎野, 田中(一), 工業火薬, 40, 23 (1979)
- 6) 生沼, 田中(一), 椎野, 工業火薬, 40, 370 (1979)
- 7) R. H. Cole, "Underwater Explosion" Princeton University Press (1948)
- 8) 花崎, 伊藤, 工業火薬, 35, 275 (1974)
- 9) 田中(一), 工業火薬, 36, 11 (1975)

Underwater shock wave pressure from lead azide

by Senzo Oinuma*, Kazumi Tanaka* and Kazuo Siino*

In the present study, at first the underwater shock wave pressure traveling from a detonating small pellet of lead azide was measured by an instrument composed of a piezo gauge and a larger sized holder reported in the preceding report. It was found that there holds the following formula between the peak pressure P_m (kg/cm^2) and the converted distance $\sqrt[3]{W}/d$ ($\text{kg}^{1/3}/\text{m}$).

$$P_m = 451 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{d} \right)^{1.16}$$

Then, using a No. 6 electric detonating cap, the particle velocity was measured by applying the pin contact method, and comparison and evaluation have been made for the peak pressure obtained by the pin contact method and that from the above formula.

Experimental pressure data by the piezo gauge and the particle velocity methods are as follows:

$$P_m = 670 \left(\frac{1}{d} \right)^{1.15} \text{ (Piezo gauge method)}$$

$$P_s = 406 \left(\frac{1}{d} \right)^{1.15} \text{ (particle velocity method)}$$

where P_m , P_s are peak pressure kg/cm^2 , d being distance dm .

As is clear from the above, P_m is 1.65 times larger than P_s . This is probably due to the fact the piezo electric instrument yields higher pressure results than the particle velocity method does.

It is assumed that the surplus pressure may derive from the reflecting pressure at the outer face of the piezo instrument.

In considering the above results, the peak pressure from lead azide pellet under free water is given in terms of P_s by the following formula.

$$P_s = 273 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{d} \right)^{1.13}$$

where P : kg/cm², $\sqrt[3]{W}/d$: kg^{1/3}/m.

(*National Chemical Laboratory for Industry, MITI)

新刊紹介

デトネーション

W. Fickett and W. C. Davis,

"Detonation" Los Alamos Series in Basic and Applied Science, edited by D. H. Sharp and L. M. Simmons, Jr.

University of California Press, 1979

現在世界の最先端を歩む研究所の一つであるロスアラモス科学研究所の基礎と応用科学シリーズの一つとして出版された本である。著者の Fickett は著名な科学者である Wood, Kirkwood の流れをくむ研究者で爆薬のデトネーション特性値を計算するため Becker Kistiakowsky, Wilson の BKW 式および Lennard-Jones, Devonshire の LJD 式研究や Zel'dovich, Neumann, Doering のいわゆる ZND モデルをより深めた反応帯を持つデトネーションの非定常伝播の理論的研究に多大な寄与をした人である。一方 Davis は爆薬のデトネーションについて数多くの精密実験を行っている人で特に Campbell らと行った爆薬の衝撃起爆実験と古典デトネーション理論の破綻と題して発表された逆転法によるニトロメタンと TNT のデトネーション特性の測定は有名である。この本の内容の概略は本協会 40 周年記念特集号の疋田と田中によって書かれたも

のとだいたい同じである。(工火誌, 40, 195(1979)) 本書では起爆や中断現象については触れられていないがこれらについては C. L. Mader が別の本で述べている。ここでは爆薬だけでなく気体のデトネーションについても古典論 (Chapmann-Jouget モデル) から最新の理論まで理解しやすく書かれている。特に反応帯をもつ非定常デトネーションについては最近の成果をまとめて掲載してあり解説と考察がつけ加えてあるので専門の人はもちろん、初心者にとっても有益であろう。最近の Bdzil, Nunzeato, Erpenbeck といったデトネーション波の構造と安定性の理論、柘植、藤原らのデトネーション特性の二価性の問題についても興味深く述べられている。デトネーション研究は反応速度論、熱力学、流体力学の基礎的な学問から成りたっているため、読者はこれらについて大学の教養課程ぐらいの知識を要する。主な項目は 1880 年から 1950 年までの定常、平面デトネーションの理論、実験とこれらの理論の比較、反応性流体力学式、1950 年以降の各種の定常デトネーションの解とその安定性となっていて、最後に理論と実験から定常平面デトネーションは不安定なため一般的には存在しないと結論している。

(田中克己)