

## 水中爆発による爆薬エネルギーの精密測定

田中克巳\*, 吉田正典\*, 米田罔昭\*\*, 水島容二郎\*\*\*

水中爆発によって生ずる衝撃波とバブルパルスによる爆薬のエネルギーの値は Cole の理論により求められるが今までは水槽の形状による効果や水中爆発により衝撃波エネルギーの消滅の機構が不明であったため実験値の発破等の実際の場合への応用には不充分である。ここでは水中発破によるエネルギー、特に衝撃エネルギーの測定法の改良と大薬量の場合のバブルパルスによるガスエネルギーの評価を試みた。実験は PETN, Tetryl, TNT, アイレマイトスラリー、コーズマイト2号について行った。その結果ボンベ熱量計や計算による爆発熱が水中爆発によっても測定できた。また池の形状による補正も可能となった。

## 1. 緒言

従来からピュツヘル熱量計や弾道振子、弾道臼砲により爆薬のエネルギーが測定されている。しかしこれらにより測定されたエネルギーと発破等実用の際に放出されるエネルギー配分については必ずしも明らかではない。周囲へ放出される爆薬のエネルギーを大別すると数 100 マイクロ秒で放出される衝撃エネルギーとガスの膨張による仕事エネルギーと衝撃加熱や熱伝導による残留エネルギーと過装薬の時にみられる爆轟ガスの突出等による損失エネルギーに分けられる。

水中爆発によって爆薬のエネルギーを測定しようという試みは数多くなされていたが衝撃圧縮によるエントロピー増加に起因する熱エネルギー等の評価が不充分であった。また爆薬のエネルギーを限られた大きさの水槽で測定する場合どうしても損失エネルギーが大きくなって精密な測定ができない。スラリー爆薬のように薬量を多くしないと理想的な爆轟をおこしにくいものへの適用は困難である。特に水中爆発によって生ずる地盤振動は周囲へ多大の迷惑を与えるので大薬量の実験を行える場所は国内では非常に少ない。それでも水中爆発によるエネルギー測定は従来のボンベ熱量計等による方法と異り衝撃波のもつ動的エネルギーと

ガス膨張による静的エネルギーを同時に評価できるという利点がある。そこで従来日本では少量 (~100g) で行われていたエネルギー測定を大薬量でも可能にするための検討を行った。実験は中国化薬群馬県吉井工場において 1978 年 9 月 27 日から 29 日の 3 日間行なわれた。

## 2. 理論と解析方法

非圧縮性流体の運動方程式より無限水中においては爆発生成ガス球の最大膨張半径は Cole<sup>1)</sup> によれば

$$a_{\max} = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{2 P_0}{3 \rho_w} \frac{T_b}{\beta}} \quad (1)$$

で与えられる。

ここで  $\beta$  はベータ関数によって決まり

$$\beta = B \left( \frac{5}{6}, \frac{1}{2} \right) \\ = 2.2405$$

である。

$P_0$ ,  $\rho_w$ ,  $T_b$  はそれぞれ静水圧、水の密度、バブルパルスの周期である。ガス球のもつ膨張のエネルギー  $E_b$  は無限水中では

$$E_b = \frac{4}{3} \pi a_{\max}^3 P_0 \\ = k P_0^{\frac{1}{2}} T_b^3 \rho_w^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

である。 $k$  は定数である。

爆薬の爆轟に伴って放出される水中衝撃波のエネルギー  $E_s$  は音響近似を用いると

\*化学技術研究所

〒305 茨城県筑波郡谷田部町東 1-1  
TEL 0298-54-4789

\*\*東京大学工学部反応化学科

〒113 文京区本郷 7-3-1  
TEL 03-812-2111 内線 7291

\*\*\*現東海大学海洋学部

〒424 静岡県清水市折戸 1000  
TEL 0543-34-0411

$$E_s = 4\pi R^2 \int_0^\theta P U_p dt \approx \frac{4\pi R^2}{\rho_w C_w} \int_0^\theta P^2 dt \quad (3)$$

で求められる。 $C_w$  は水の音速、 $R$  は爆源からの距離、 $P$  は  $R$  における圧力、 $\theta$  は衝撃波の持続時間を示す。

しかし実際の場合では、無限水中という条件を満足する事は困難である。そのため薬量が多いほど単位質量当りのガスエネルギー  $E_b$  は水面からの希薄波や浮力効果によるガスの浮上のために低くなる。また  $E_s$  は多少距離による減衰があるため小薬量では低めになる。このような効果によるエネルギーの損失を補正する手段として Bjarnholt<sup>2)</sup> は次のような方法を提案した。

パルパルスの時間間隔は理想的には薬量の立方根に比例するが実際には実験に用いた水槽の効果がある。このため、用いられる水槽に対し、静水圧  $P_0$  を一定にとった場合のパルパルス幅が薬量に対して

$$\begin{aligned} T_b^* &= aW^{1/3} + bW^{-2/3} \\ &= k_1 E_b^{1/3} + k_2 E_b^{2/3} \end{aligned} \quad (4)$$

で表わされるとする。ここで  $a, b, k_1, k_2$  は使用した水槽と水深等の実験条件に固有の定数である。

実験においてはその時の気象条件等により静水圧を一定にとることは困難なため  $T_b^*$  は(2)式より測定時の静水圧  $P_0'$  とその時測定された  $T_b'$  を補正し求められるものとする。

$$T_b^* = T_b'(P_0'/P_0)^{5/6} \quad (5)$$

$k_1$  は  $E_b^{1/3} \rightarrow 0$  ( $W^{1/3} \rightarrow 0$ ) の場合の  $T_b$  と  $E_b^{1/3}$  の比でこれは無限水中の場合 相当するから(2)式より

$$k_1 = k^{-1/3} \rho_w^{1/2} P_0^{-5/6} \quad (6)$$

である。 $E_b$  は  $W$  に比例するので(4)式より

$$k_2 = k_1^2 b/a^2 \quad (7)$$

となる。(4)式と(7)式より、 $b < 0$  なので、 $E_b > 0$  の条件を用いて

$$\begin{aligned} E_b &= \frac{1}{8C^3 k_1^3} (\sqrt{1 + 4CT_b^*} + 1)^3 \\ C &= b/a^2 \end{aligned} \quad (8)$$

が得られる。

次に残留エネルギー  $E_r$  について考えてみる。一般に衝撃圧縮はエントロピー増加を伴うためエネルギー吸収の方が等エントロピー膨張によるエネルギー放出より大きい。爆源近くの水は衝撃圧力が開放されて再び大気圧になっても温度は初温より高くなったままになっている。この温度は残留温度と呼ばれるが衝撃圧が高い程高くなる。この効果は(3)式に含まれておらず、また爆源とピエゾゲージの間にある残留エネルギー値は池全体の水温の変化の測定を行わなければ得

られないので不可能であろう。しかし  $E_r$  は  $E_s$  にほぼ比例しその比例系数は爆轟圧  $P_{CJ}$  に関する量と推定される。Bjarnholt<sup>2)</sup> は

$$E_r = (\mu - 1) E_s \quad (9)$$

とした。そうすると放出された全エネルギー  $E_{tot}$  は

$$\begin{aligned} E_{tot} &= E_b + E_s + E_r \\ &= E_b + \mu E_s \end{aligned} \quad (10)$$

となる。 $E_{tot}$  はボンベ熱量計で測られるいわゆる爆発熱  $Q$  にほぼ等しいので  $Q, E_b, E_s, P_{CJ}$  がわかった爆薬より  $\mu$  を  $P_{CJ}$  の関数として表わす事ができる。Bjarnholt の実験値から最小自乗法により近似式

$$\begin{aligned} \mu &= 1 + 1.3328 \times 10^{-2} P_{CJ} - 6.5775 \times 10^{-4} P_{CJ}^2 \\ &\quad + 1.2594 \times 10^{-7} P_{CJ}^3 \end{aligned} \quad (11)$$

を求めた。但し  $P_{CJ}$  はどの爆薬も

$$P_{CJ} = \rho_0 D^2/4$$

とした。 $\rho_0$  は爆薬の密度で  $D$  は爆速である。

以上の議論は球面爆轟波を仮定しているが実際には爆薬量が小さいので完全な球面波はできない。そこで Bjarnholt の提案に基いて爆薬の形状系数  $K_f$  を導入して

$$E_{tot} (=Q) = K_f (E_b + \mu E_s) \quad (12)$$

とする。我々の実験条件では  $K_f$  は 1.07 とされる。

### 3. 実験

使用した爆薬は PETN (粉状)、TNT (鋳造)、テトリル (圧填)、コーズマイト 2 号 (粉状)、アイルマイトスラリーである。TNT とテトリルのペレットの直径は薬長と同程度にとった。TNT とテトリルはシート爆薬を伝爆薬として適量使用し他の爆薬は雷管一本で起爆した。

測定は Fig. 1 に示すようにして行った。爆薬と圧力計は池の中心より各々反対方向に 1 m 離して設置した水深は 2 m とした。圧力計は Kistler 社の Model 211 B 1 Serial No. 201 フルスケールの圧力 10k psi、感度 0.53 mV/psi のピエゾトロンでカプラー (549A) を通してデジタルメモリー (岩崎通信機社) とオシロスコープの各々に入力した。ピエゾは Fig. 2 に示すようにして防水した。

トリガー入力起爆した時の雷管にまきつけたエナメル線の短絡による C-R 回路の放電パルスを用いた。デジタルメモリーは 8 bit 1024 Word のものでサンプリング間隔は 2  $\mu$  sec である。ピエゾトロンからの圧力波信号はデジタルメモリーで  $\pm 1V$  または  $\pm 2.5V$  の範囲で数値化される。データはインターフェイス (TIK 社) により紙テープにパンチして記録した。同時にパルパルスの時間間隔もオシロスコープにより測定した。オシロスコープの掃引速度は Time Pulse Generator で校正した。

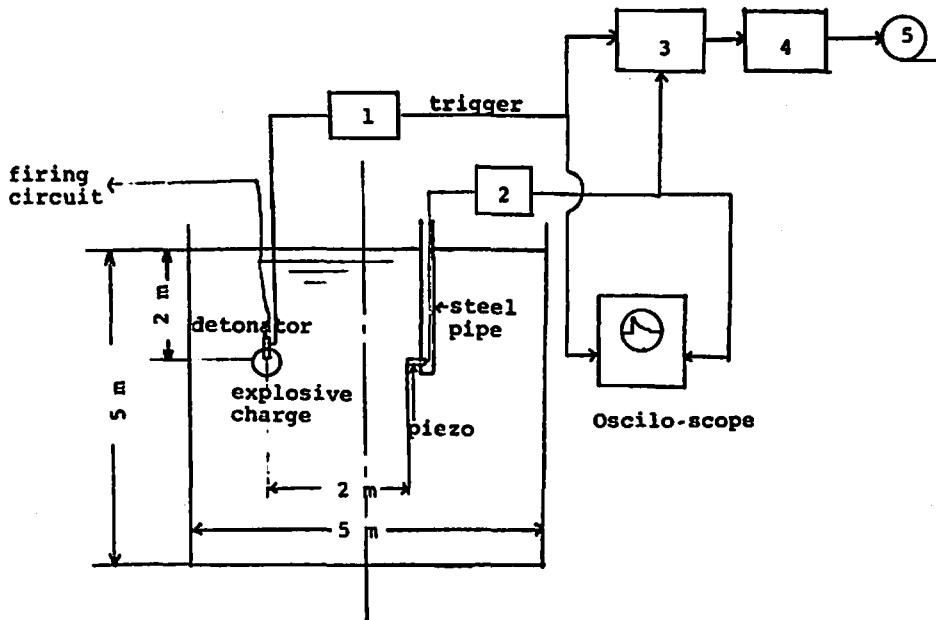


Fig.1 Diagram of experimental configuration for energy measurements by underwater detonation technique.

1. Pulse generator    2. Piezo amplifier    3. Digital memory  
 4. Interface for paper tape output    5. Paper tape puncher

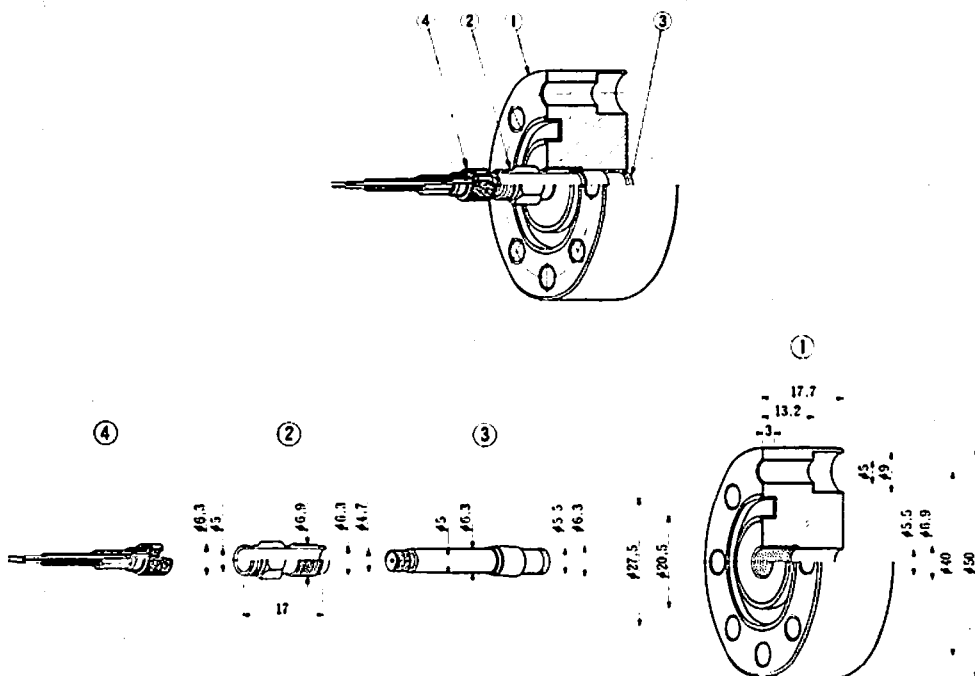


Fig.2 Transducer device for measurements of the pressure of a shock wave in water.

1. Brass holder of transducer    2. Connector of a transducer to cable  
 3. Transducer    4. Cable

**Table 1** Summary of experimental conditions and results. Data in parenthesis are presumed value due to unknown density of explosives. All data are measured at the depth of 2 m. In the initiator system, 'c' means the No.6 detonator and 'c+5g' means the No.6 detonator plus 5g booster charge. Charge weight does not include the weight of detonator and booster. S-1 and S-2 slurry are water-gels contained Hydrazine Nitrate.

No.	Explosive	Charge Weight (g)	Charge Density (g/cc)	Initiator System	Detonation Velocity (km/sec)	Bubble Pulse (msec)	Peak Press (atm)	Water		Atmospheric		
								Temp. (°C)	Density (g/cc)	Press. (mmHg)	Temp. (°C)	
1	Detonator					22.2	19.7	21.0	1.001	752.8	19.0	
2	Sheet explosive	10	(1.1)	c		50.2	45.6	19.6	1.004	750.2	18.2	
3		30		c		-	59.0	19.6	1.004	750.2	18.2	
4		30		c			74.2	63.1	19.6	1.004	750.2	18.2
5	PETN (powder)	10	(0.9)	c		66.0	45.6	21.0	1.001	752.8	19.0	
6		10		c			91.2	52.8	19.6	1.004	750.2	18.2
7		30		c			94.3	-	19.6	1.001	752.8	19.0
8		70		c			118.0	-	19.6	1.001	752.8	19.0
9		70		c			118.8	78.7	19.6	1.004	750.5	17.0
11		130		c			150.4	152.7	20.2	1.001	752.8	19.0
12		220		c			-	155.3	20.2	1.001	753.5	18.5
13		220		c			177.2	176.0	20.2	1.001	753.9	10.5
14		350		c			208.8	199.3	19.6	1.004	747.8	18.2
15		Tetryl (pressed)		10	1.60	c+1g	7.18	54.4	47.6	20.2	1.001	753.9
16	9.8		1.59	c+2g	7.18	55.7	51.8	19.6	1.001	750.5	17.0	
17	30.1		1.61	c+3g	7.19	77.9	63.1	20.2	1.001	753.9	20.5	
18	30.3		1.61	c+3g	7.19	77.8	53.8	19.6	1.004	750.5	17.0	
19	70		1.60	c+5g	7.18	103.9	75.6	20.2	1.001	753.9	20.5	
20	130		1.60	c+5g	7.18	128.9	139.8	20.2	1.001	753.9	20.5	
21	220.3		1.58	c+10g	7.18	154.4	168.2	20.2	1.001	753.9	20.5	
22	340.6		1.58	c+10g	7.18	181.3	196.7	19.6	1.004	747.8	18.2	
24	TNT (cast)	10.5	1.54	c+3g	6.75	47.7	40.4	19.6	1.004	750.5	17.0	
25		30	1.52	c+3.4g	6.69	69.2	45.6	20.2	1.001	753.5	18.5	
26		30	1.54	c+4g	6.75	63.0	43.5	20.2	1.001	753.9	20.5	
27		69.7	1.56	c+3.3g	6.81	90.1	43.5	20.2	1.001	753.5	18.5	
28		69.9	1.56	c+6g	6.81	84.9	45.6	19.6	1.004	750.5	17.0	
29		125.1	1.58	c+3g	6.87	84.2	46.6	20.2	1.001	753.5	18.5	
30		124.9	1.54	c+11g	6.75	103.6	49.2	20.2	1.001	753.9	20.5	
32		200.1	1.57	c+10g	6.84	140.4	113.9	20.2	1.001	753.9	20.5	
33		Iremite (slurry)	30	(1.08)	c	(3.8)	67.1	54.9	19.6	1.004	747.8	20.5
34	51.3		c		86.3		63.1	19.6	1.004	750.2	18.2	
35	90.5		c		99.2		69.4	19.6	1.004	750.2	18.2	
36	104		c		100.8		68.3	19.6	1.004	750.6	17.0	
37	200		c		143.9		142.3	19.6	1.004	750.6	17.0	
38	300		c		167.3		152.7	19.6	1.004	750.2	18.2	
39	S-1 slurry	107	1.21	c	5.0	114.2	77.6	20.2	1.001	753.9	20.5	
40	S-2 slurry (Aluminum)	109	1.16	c	5.0	121.9	72.5	19.6	1.004	750.5	17.0	
41	Kohzmit#2	91.4	(1.1)	c	(5.1)	119.3	76.6	19.6	1.004	750.6	17.0	
42		90.0		c		117.9	-	19.6	1.004	750.6	17.0	
43		193.9		c		163.3	155.3	19.6	1.004	750.2	18.2	

大気圧は水銀気圧計により温度と重力効果に対する補正をして測定した。測定は午前と午後各一回行ったが気圧変動は5mmHg程度であった。

水の密度  $\rho_w$  はボーメの比重計によった。

ガスエネルギー  $E_b$  の測定精度は(2)式より

$$\frac{|\Delta E_b|}{E_b} = 2.5 \frac{|\Delta P_0|}{P_0} + 3 \frac{|\Delta T_b|}{T_b} + 1.5 \frac{|\Delta \rho_w|}{\rho_w}$$

となる。したがって静水圧、水の密度は0.1%の誤差であるが時間測定精度は読み取り誤差のため0.5%程度と考えられ  $E_b$  は±2%程度の誤差があると予測される。

衝撃波エネルギー  $E_b$  の測定に寄与する誤差にはデジタルメモリのサンプリング間隔が長いことによるピーク圧力の過少評価とサンプリングデータの bit 数の不足による誤差がある。(3)式において  $P = P_{\max} e^{-bt}$  とすると

$$\frac{\Delta E_b}{E_b} = 2 \frac{|\Delta R|}{R} + \frac{|\Delta \rho_0|}{\rho_0} + \frac{|\Delta C_0|}{C_0} + 2 \frac{|\Delta P_{\max}|}{P_{\max}}$$

となる。 $\Delta P_{\max}$  は±5気圧程度と考えられるのでピーク圧が低い所ほど誤差が大きい。30gの薬量で20%、350gで4%程度と考えられる。 $E_b$  は換算距離( $W^{1/3}/R$ )の0.05から0.12乗に比例して減少するので小薬量での誤差は大きい。実験条件とバブルパルス、ピーク圧力の測定値をTable 1に示す。

#### 4. 実験結果の解析

各爆薬についてのガスエネルギー  $E_b$  とガスエネルギー  $E_g$  についての測定結果には雷管と伝爆薬に使用したシート爆薬(TNTとテトリル)のエネルギーが

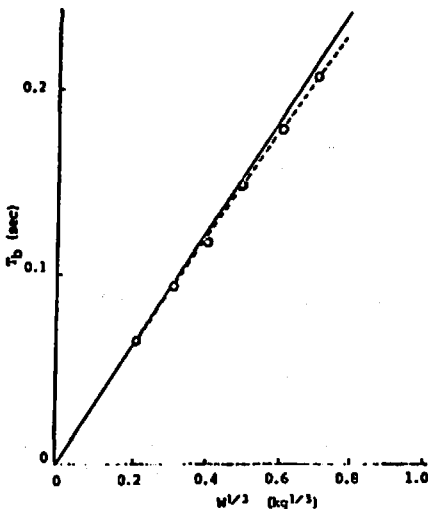


Fig. 3 Period of the first bubble oscillation measured at 2m depth of water(PETN).

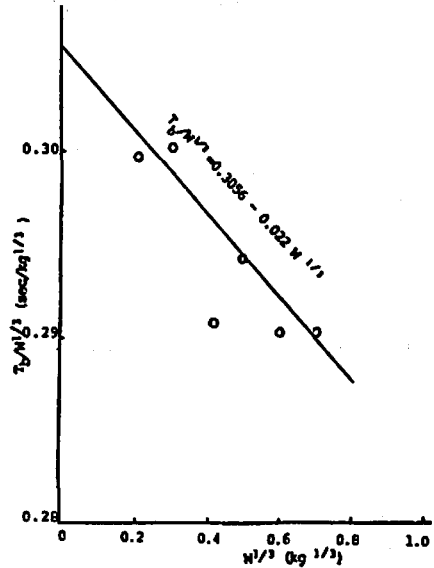


Fig. 4 The first bubble pulse period vs charge weight measured at 2m depth of water (PETN)

含まれているので予め測定した雷管と伝爆薬のエネルギーを各測定結果から差し引いた。

(4)式の補正係数  $a, b$  は一連のPETNについての結果から求められた。Fig. 3に示すようにバブルパルスの時間間隔  $T_b$  は薬量が増大するにつれて直線性から外れてくる。 $T_b/W^{1/3}$  と  $W^{1/3}$  をプロットするとFig. 4に示すようになりこれより(4)式の定数  $a, b$  は  $a = 0.3056 \pm 0.002$  (sec/kg<sup>1/3</sup>)

$$b = -2.220 \times 10^{-2} \pm 0.404 \times 10^{-2} \text{ (sec/kg}^{2/3}\text{)}$$

が得られる。これから(8)式により他の爆薬のガスエネルギー  $E_b$  が求められる。係数  $b$  は水深が浅い程大きい。

衝撃エネルギー  $E_b$  はデジタルメモリーから紙テープをミニコンピューターにかけて求めた。水中衝撃波のデータはディジタルメモリーが1Wordあたり8bitで数値化されているが実際に使用するのは6bitぐらいであり各圧力は1から64の整数値として記録されている。これらの数値を実際の圧力値に変換し(3)式を差分型にして  $E_b$  は

$$E_b = \frac{4\pi R^2}{\rho_w C_w} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (P_i^2 + P_{i+1}^2) \Delta t$$

より求められた。 $\Delta t$  はサンプリングの時間間隔で2  $\mu\text{sec}$  である。積分は衝撃波が到達した時間を0にとり3気圧にさがるまで行った。

#### 5. 結果と考察

Table 2 Summary of estimated energies.  $T_b^*$  is corrected bubble pulse period by eq. (5) to 760 mmHg atmospheric pressure. Value of  $E_b$  and  $E_s$  does not include the energy of detonator and booster charge.

No.	Explosive	$\mu$	$T_b^*$ (msec)	$E_b$ (cal/g)	$E_s$ (cal/g)	$E_{tot} (=Q)$ (cal/g)	$E_b/Q$ (%)	note
1	Detonator		22.2	271.5	233.3	-	-	for 1 detonator
2	Sheet explosive	1.668	48.1	292.0	211.8	690.5	42.3	
4			72.7	341.4	174.3	676	50.5	
5	PETN (powder)	1.668	64.5	716.7	268.5	1246	57.5	} low accuracy of $E_s$ due to low pressure
7			93.0	730.3	-	-	-	
9			119.9	681.0	213.0	1109	61.4	
11			149.0	723.9	356.2	1410	51.3	
13			175.6	715.7	321.6	1340	53.4	
14			205.8	739.2	333.8	1387	53.3	
15	Tetryl (pressed)	2.091	51.3	356.5	257.2	957	37.2	} low accuracy of $E_s$ due to low pressure and incomplete detonation
17			74.7	371.7	176.7	793	46.9	
19			100.9	402.0	162.7	794	50.6	
20			126.4	434.4	255.1	1036	42.0	
21			151.3	448.6	243.7	1025	43.8	
22			177.5	475.8	248.4	1065	44.7	
24	TNT		39.2	256.4	196.8	418.9	61.2	} Incomplete detonation due to weak initiation
26			57.3	166.2	61.25	308.8	53.8	
28			80.0	196.9	68.3	356.8	55.2	
30			98.3	208.0	93.1	421.6	49.3	
32			136.9	361.2	114.4	631.1	57.2	
33	Iremite	1.460	65.3	346.9	139.8	483	51.2	} low accuracy of $E_s$ due to low pressure and incomplete detonation
34			84.8	320.3	99.9	499	64.2	
35			97.7	280.1	100.0	456	61.4	
36			99.3	256.4	96.8	426	60.2	
37			142.1	404.0	219.0	774.4	52.2	
38			165.2	431.4	183.2	747.8	57.7	
39	S-1 Slurry	1.570	113.0	372.7	127.8	608.4	61.3	
40	S-2 Slurry	1.570	120.3	441.9	157.1	730.4	60.5	
41	Kohzmitte	1.694	117.7	492.8	169.9	835.3	59.0	
43			161.3	618.6	258.9	1131.1	54.7	

各々の実験で得られた衝撃エネルギー  $E_s$  とガスエネルギー  $E_b$  及び全エネルギー  $E_{tot}$  を Table 2 に示す。 $E_{tot}$  は(2)式より求めたものである。

PETN の  $E_b$  は 10g から 350g まで比較的一定の値となっている。しかし  $E_s$  は前述のように 100g 以下では低い値になっている。PETN ではピーク圧力  $P_{max}$  と換算距離の関係は Fig. 5 に示されるように

$$P_{max} = 712(W^{1/3}/R)^{1.22}$$

となった。ここで  $P_{max}$  は atm,  $W$  は kg,  $R$  は m であ

る。全エネルギーに占める  $E_b$  の割合は 52% 前後となった。350g の場合の衝撃波形と衝撃エネルギーの時間変化を Table 6 に示す。

PETN についての実験結果を一次元ラグランジュ流体力学式コードによる数値解析と比較した。解析は 350g, 比重 0.9g/cm<sup>3</sup> の PETN の爆轟の場合についてのみ行った。PETN の爆轟生成ガスの状態式は木原一足田式による特性値を使用した。水の状態式は Walsh ら<sup>3)</sup> のものを用いた。 $P_{max}$  と換算距離の関係は図 5

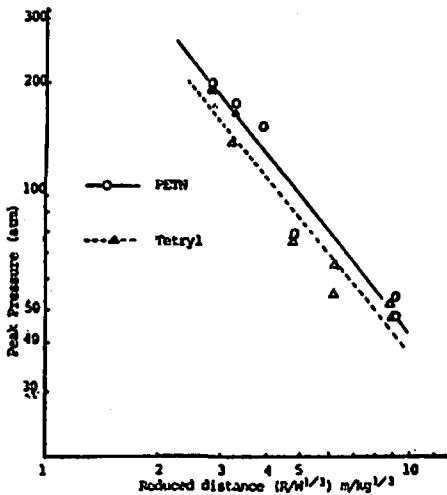


Fig. 5 Peak pressure vs reduced of underwater detonation. A solid line and a dashed line<sup>o</sup> show results of hydrodynamic calculation.

に示されるように実験とよく合う。また圧力波形も実験とよく合った。この解析からピエゾによる測定は妥当なものであると考えられる。350gのPETNの水中爆轟において放出されるエネルギーは(3式で表わされている。(3式の左辺の式は水の圧縮性を考慮したものであるが解析値は爆源から50cmのところでは663 cal/g 右辺の音郷近似で390 cal/g, 100cmのところでは同じく536 cal/gと370 cal/g, 150cmのところでは485 cal/gと360 cal/gとなり、爆源から離れるにつれて通過する衝撃エネルギーは急激に減少する。また解析によると系全体で放出されるエネルギーは木原-疋田式ではTable 3に示すように1468 cal/gであるが、爆轟後1.5 msecでの系の放出エネルギーは水の加熱に使われた散失エネルギーが177 cal/g、有効エネルギーである運動エネルギーは1199 cal/gで総量1376 cal/g(可能なエネルギーのうちの94%)になる。したがって水中爆発では有効エネルギーの割合は80%程度であることがわかる。実験でも  $(E_b + E_s)/E_{tot}$  が77%となっている。更に解析結果より Bjarnholt の衝撃 エネル

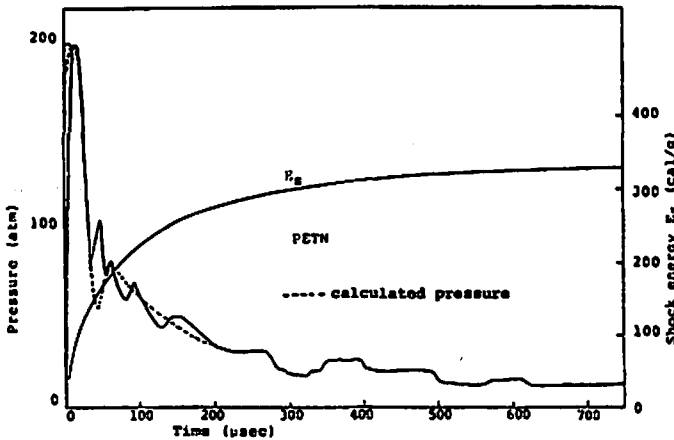


Fig. 6 Solid curves show pressure and shock energy profiles observed at 2m away from an underwater detonation of PETN ( $\rho_0 = 0.9 \text{ g/cc}$ ,  $W = 350 \text{ g}$ ) at 2m depth of water (Shot No. 14). A dashed curve shows a calculated result by one dimensional Lagrangian hydrodynamic code.

ギーの経験的測定法は爆源からの換算距離が  $3 \text{ mkg} / \text{W}^{1/3}$  のところで用いた方がよいこともわかる。Table 3にテトリル、アイレマイト、2号コーズマイトの結果についても示した。PETNの場合を除いて何れも薬量効果が現われた。これは小薬量の場合、圧力が低くて測定系が正確に作動しない事も考えられるが、 $E_b$ も低くなっている事から伝爆薬の効果もあると考えられる。

## 6. 結 論

水中爆発によるエネルギー測定法は爆薬のもつエネルギーのうちガスエネルギーと衝撃エネルギーを正確に測る事ができるという利点を有している。本実験法によれば薬量がある程度大きくてもエネルギーを正確にもとめられる事がわかった。これはスラリー爆薬や硝安を多量に含んだ爆薬のように薬量が少いと完全に爆轟しないようなものに特に有効である。またこの

Table 3 Summary of estimated energies.  $E_{tot}$  of KH is calculated value by Kihara-Hikita equation of state.

Explosive	$\rho_0$ (g/cc)	$\mu$	$E_b$ (cal/g)	$E_s$ (cal/g)	$E_b/Q$ (%)	$E_{tot} (= Q)$ (cal/g)		
						this work	ref.	KH
PETN	(0.9)	1.668	725.2	337.2	52.6	1378±40	1385 <sup>1</sup> 1450 <sup>2</sup>	1468
Tetryl	1.60	2.091	452.9	249.1	43.5	1042±20	1047 <sup>3</sup> 1107 <sup>3</sup>	1385 (1045) <sup>4</sup>
Iremite	1.08	1.460	417.7	201.1	54.9	761.1±20	-	-
KoHzmite#2	(1.1)	1.694	618.6	258.9	54.7	1131	1144 <sup>5</sup>	-

ref. <sup>1</sup> G. Bjarnholt, R. Holmberg Sixth Symp. on detonation 540 (1976)

ref. <sup>2</sup> Donna Prica, Chem. Rev., 59, 801, (1959)

ref. <sup>3</sup> Arm. Res and Development Fstb. Rep., (S) 4/56

note<sup>4</sup> Calculated density of explosive is 1.0g/cc

ref. <sup>5</sup> 工業火薬ハンドブック, 共立

方法により爆圧が高いものは衝撃エネルギーの占める割合が大きくなる事もわかった。今後、以上のようにして得られたデータが発破計画等に有効に利用されるものと期待される。

#### 謝 辞

本研究は工業火薬協会爆発専門部会と中国化薬吉井工場の援助によって行われた。伊藤(清) 部会長と秋久吉井工場長他実験に協力された方に深く感謝する。

#### 文 献

1) R. H. Cole, "Underwater Explosions", Prince-

ton Univ Press, Princeton, New Jersey, USA (1978)

2) G. Bjarnholt, R. Holmberg. Sixth Symposium (International) on Detonation, 540, (1976)

3) M. H. Rice, J. M. Walsh, J. Chem. Phys, 26, 824 (1957)

4) C. L. Mader, "Compressible Numerical Calculations of Underwater Detonations", Los Alamos Scientific Laboratory Report LA 45 94 (1971), Los Alamos, New Mexico



The Precise measurement of the Energy of Explosives  
by underwater detonation

by Katsumi TANAKA\*, Masatake YOSHIDA\*  
Kuniaki YONEDA\*\* and Yojiro MIZUSHIMA\*,\*\*\*

There exist several uncertainties in the measurement of the energy by the underwater detonation of a high explosive because of the experimental condition which affects the dissipation of the energy of shock waves. In this work, a technique of the energy measurement by underwater detonation, especially concerning the evaluation of the energy of the shock wave and that of the bubble pulse, has been studied. Experiments have been performed for charges of PETN, Tetryl, TNT, Iremite water gels and Kohzmite No. 2. These results show a good agreement with both values obtained by using the heat of explosion measured by the bomb calorimeter and values from the theoretical calculation.

This technique will be applicable to all underwater detonation under various conditions.

(\* National Chemical Laboratory for Industry, Yatabe Higashi 1-1,  
Tsukuba, Ibaraki.

\*\* University of Tokyo, Faculty of Engineering, Reaction Chemistry,  
Hongo 7-3-1, Bunkyo, Tokyo.

\*\*\*Present Address, Tokai University, Faculty of Marine Science and  
Technology, Orito 1000, Shimizu-City, Shizuoka.)