



## 水中爆発を用いた爆発性の評価(I)

### —可変起爆剤試験による衝撃感度評価—

金子良昭\*, 木村 歩\*\*, 吉田信生\*\*,

田村昌三\*\*\*, 吉田忠雄\*\*\*

水中爆発を利用した可変起爆剤試験を行い、弾動臼砲を使用した場合と同様の結果を得、衝撃感度試験法として使用できることを確かめた。使用した試料は、衝撃感度の境界物質として知られているPETN, m-DNBの外に産業用火薬類としてエマルジョン爆薬、黒色火薬を使用し、反応性工業薬品としてADCA及びAIBNを使用した。本法は従来の弾動臼砲を用いた場合に比べて発生音が比較的小さいという水中爆発の持つ利点の他に、気泡の脈動エネルギーを求めることにより、感度を爆発エネルギーにより直接評価できる特徴を持つ。また、弾動臼砲や弾動振子と同様に水中爆発を用いて伝爆性試験を行うことが出来ることを予備的に確かめた。

#### 1. はじめに

筆者らの一部は以前に衝撃感度試験法として、Mk III弾動臼砲を使用した可変起爆剤試験法を開発し、報告したり<sup>1)</sup>。この試験法は、通常の落槌感度試験法では測定できないような鈍感な爆発物の衝撃感度試験法として有効な方法であり、固形物あるいは粉状物のような性状の違いによる感度の差も容易に調べる事が出来る<sup>2)</sup>という特徴を持っている。可変起爆剤試験法は起爆剤の量を変化させることにより、試料に加える衝撃波の強さを変化させ、爆発した試料の割合を弾動臼砲の振れから推定し、試料を爆発させるのに要する衝撃波の相対的強さを推定する方法である。爆発した試料の割合は、弾動臼砲の振れ幅や弾動振子の振れ幅により調べる事ができるが、その他に砂中爆発による漏斗孔の大きさや水中爆発の脈動エネルギー<sup>3)</sup>によっても調べる事ができる。水中爆発実験では、爆発のエネルギーを衝撃波エネルギーと生じた気泡の脈動エネルギー(以下、気泡エネルギーまたはEbと略す)に分けて測定することができ<sup>4)</sup>、特に気泡エネルギーは比較的容易に高精度で測定できる<sup>5)</sup>という特徴がある。本報告では、水中爆発の気泡エネルギーを測定することにより爆発した試料の割合を推定し、水中爆

発を可変起爆剤試験に適用した結果を報告する。

#### 2. 実験

##### 2.1 試料

$\alpha$ ,  $\alpha'$ -アゾビスイソプロピロニトリル(AIBN)及びタルクは、それぞれ和光純薬㈱製の試薬特級及び試薬一級を、アゾジカルボンアミド(ADCA)は、大塚化学㈱製の工業製品を使用した。m-ジニトロベンゼン(m-DNB)は東京化成㈱製の試薬一級(m.p. 77~88℃, 粒状)及び再結晶品(粉状)の二種を使用した。爆薬及び雷管は、日本化薬㈱製のものを使用した。

特殊雷管である0号, 1号, 2号或は, 3号の各弱雷管は、点火玉方式のものを使用した。これらは、起爆薬としてDDNPを0.2g使用し、添装薬としてペントライト(PETN/TNT=1/1)をそれぞれ0, 0.1, 0.2及び0.3g使用している。

##### 2.2 実験装置

###### 2.2.1 水槽

水中爆発実験には日本化薬㈱姫路工場内にある上部径6.0m, 下部径4.0m, 深さ2.1mの水槽を使用した。

###### 2.2.2 試料容器

試料容器としては、弾動臼砲を用いた可変起爆剤試験で使用したラポランパックサンプルビンそのままを使用した。AIBNやADCAを試料とした場合は、比重が小さい為に15mlの容器を、その他の試料については総て10mlの容器を使用した。(Fig. 1)

###### 2.2.3 計測機器

昭和62年9月1日受理

\*日本化薬株式会社火薬研究所

山口県厚狭郡山陽町大字部 2300

\*\*日本化薬株式会社火薬研究所姫路分室

兵庫県姫路市豊高町豊高 3903-39

\*\*\*東京大学工学部反応化学科

東京都文京区本郷 7-3-1

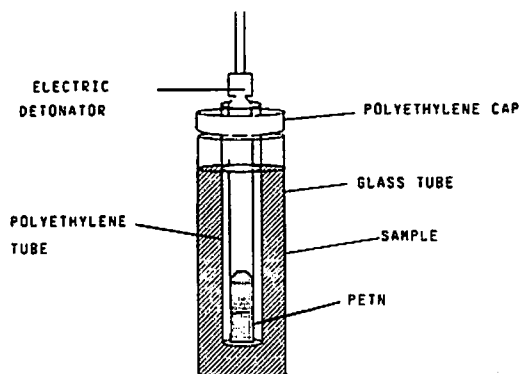


Fig. 1 Sample assembly

水中での圧力波の測定は、豊田工機特製圧力変換器モデル PMS-10M-500H を使用した。検出された圧力波は、ブリッジを通してデジタルストレージオシロスコープ(日立モデル VC-6015)に表示して、X-Y レコーダー(日本電気三栄特製 XY-8U16)を用いて出力して解析した。水中より空気中に投射された圧力波の測定には、コンデンサーマイクロホンを使用し、出力倍数をインパルス精密騒音計(リオンモデル NA-61)を通して上記と同様の方法で解析した。

### 2.3 実験方法

実験は、Fig. 2に示したような2種類の構造の試料固定装置を使用し、試料を中央に固定して、クレーンにより予め定めた水深まで沈めて行った。起爆剤の気泡エネルギーを求める実験ではFig. 2(a)の構造の装置を使用し、水深は0.4mとした。薬量の多い可変起爆剤試験及び可変試料量試験ではFig. 2(b)の構造の装置を使用し、水深は1.0mとした。試料位置の固定には、細い針金を使用した。また、計算に用いた大気圧は、姫路工場で一時間毎に測定した値を使用した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 起爆剤の気泡エネルギー

まず、最初に起爆剤の持つエネルギーを測定した。起爆剤として、0~6号雷管単独の場合と試料容器に不活性物質としてタルクを加えた場合の水中爆発により生ずる気泡エネルギー( $E_b$ )を気泡脈動の第一周期( $T_b$ )より求めた。結果をTable 1に示す。気泡エネルギー( $E_b$ )の計算は、次式<sup>5)</sup>に従った。

$$E_b = 6.84 \times 10^7 P_0^{5/2} T_b^3$$

ここで、 $E_b$ : 気泡エネルギー(J)

$P_0$ : 静水圧(bar)

$T_b$ : 気泡脈動の第一周期(sec)

この結果、雷管の添装薬量と気泡エネルギーとの間には、一次の関係があることが分かった。0~6号雷管を単独で水中爆発させた際に発生する気泡エネルギー

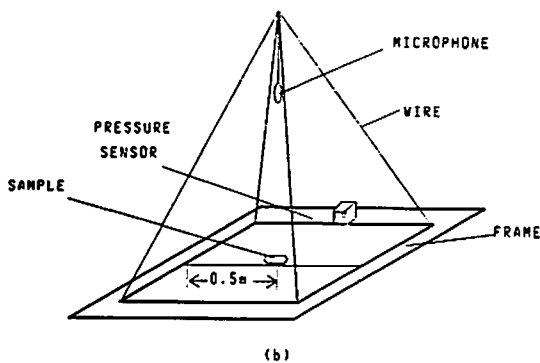
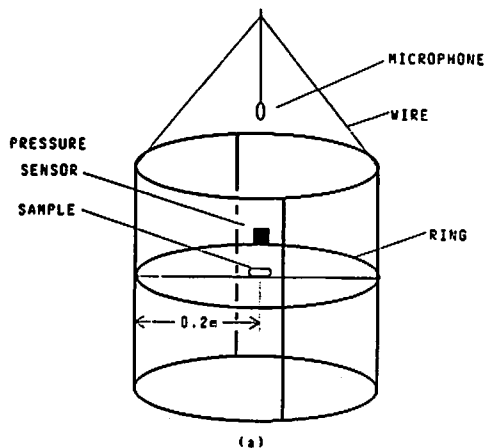


Fig. 2 The supporting devices for the sample and instruments in the underwater explosion test

Table 1 First pulsation period ( $T_b$ ) and energy ( $E_b$ ) of gas bubble with detonator

Detonator	Period (ms)	$E_b$ (kJ)
No. 0	15.4	0.33
No. 1	18.0	0.52
No. 2	19.4	0.65
No. 3	21.4	0.87
No. 6	22.9	1.07
No. 0+Talc	14.0	0.21
No. 1+Talc	15.9	0.31
No. 2+Talc	17.6	0.42
No. 3+Talc	19.8	0.60
No. 6+Talc	20.6	0.67

は、試料容器に予めタルク(不活性物質)を詰めポリエチレン内筒を使用して水中爆発させた場合と比べて、約1.5倍大きい。

これは、後者の場合雷管の爆発エネルギーの一部が内筒の破壊やタルクに吸収される為であろうと考えられ

Table 2 The period (Tb) and energy (Eb) with PETN and detonator in a polyethylene inner tube

Initiator	Period (ms)	Eb (kJ)	ΔEb* (kJ)
No. 0+0.1g PETN	17.2	0.39	0.19
No. 0+0.2g PETN	19.6	0.58	0.38
No. 0+0.3g PETN	21.3	0.74	0.54
No. 6+0.1g PETN	22.3	0.85	0.17
No. 6+0.2g PETN	23.6	1.01	0.33
No. 6+0.3g PETN	24.9	1.19	0.51
No. 6+0.4g PETN	26.6	1.45	0.77
No. 6+0.5g PETN	27.3	1.56	0.88
No. 6+0.6g PETN	28.3	1.74	1.06

\*ΔEb=Eb-Eb (detonator)

Table 3 The initiation energy and PETN equivalent of initiators

Initiator	initiation energy (kJ)	PETN equivalent (g)
No. 0	0.20	0.18
No. 1	0.32	—
No. 0+0.1g PETN	0.39	0.28
No. 2	0.44	—
No. 3	0.56	—
No. 0+0.2g PETN	0.58	0.38
No. 0+0.3g PETN	0.74	0.48
No. 6	0.68	0.60
No. 6+0.1g PETN	0.68	0.70
No. 6+0.2g PETN	1.06	0.80
No. 6+0.3g PETN	1.24	0.90
No. 6+0.4g PETN	1.42	1.00
No. 6+0.5g PETN	1.60	1.10
No. 6+0.6g PETN	1.78	1.20

る。また、以前に行った弾動臼砲による試験と比較する為、ベンスリットを0号雷管及び6号雷管に0.1gづつの増分で添加したものを試料として、ポリエチレン内筒に入れて起爆した場合の気泡エネルギーを求めた。これをTable 2に示す。このTable 1, Table 2より計算した各雷管及びベンスリットを起爆剤として起爆した場合の起爆エネルギー値をTable 3に示す。以下、可変起爆剤試験に於ては、各測定値より算出したエネルギー値より各起爆剤のエネルギーを差し引いた正味のエネルギー値(net-Eb)を定義し、起爆エネルギー/net-Eb曲線を用いて感度を評価した。また、水中で測定された圧力波周期と空気中で測定された圧力波周期とはほぼ等しい結果を得、水中センサーを用いなくてもマイクロホンにより気泡エネルギーの測定が

可能なことを確認した<sup>6)</sup>。

### 3.2 爆薬薬量と気泡エネルギーの関係(可変試料量試験)

予め、6号雷管で起爆できることが分かっているベンスリット及びエマルジョン爆薬について薬量と気泡エネルギー(net-Eb)との関係を調べた。その結果をTable 4, 及びFig. 3に示す。

ベンスリットの場合は、本実験で用いた試料量の範囲(7g以下)では、薬量と気泡エネルギーとは直線関係があることが分かる。一方、エマルジョン爆薬の場合は、この実験設備では、ある程度の薬量までは気泡エネルギーとの直線性は保たれているが、それ以上の薬量になると直線からはずれてくる事を示している。この限界値は、田中による実験結果<sup>7)</sup>と比較するとや

Table 4 Eb of explosives initiated by No.6-detonator

Material	Weight (g)	Period (ms)	Eb (kJ)	$\Delta Eb^*$ (kJ)
PETN	1.0	32.9	3.1	2.46
	2.0	40.0	5.6	4.97
	3.0	44.7	17.8	7.17
	4.0	48.5	10.1	9.42
	5.0	52.3	12.6	11.9
	6.0	56.3	15.8	15.1
	7.0	68.8	18.0	17.3
Emulsion explosive	5.0	32.9	3.1	2.4
	25.0	74.0	36.1	35.0
	50.0	95.8	78.4	77.3
	75.0	104.5	102.0	100.9
	100.0	114.0	132.0	130.9

\*  $\Delta Eb = Eb - Eb$  (detonator)

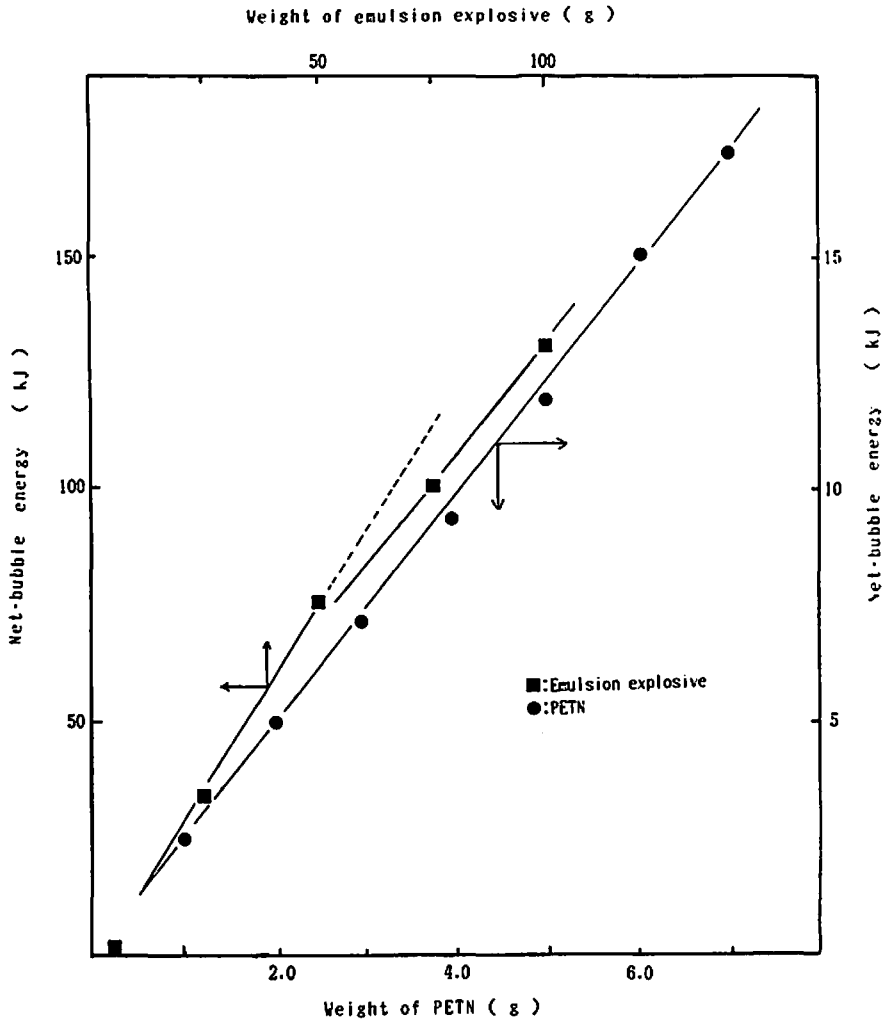


Fig. 3 Plot of bubble energy vs. weight of explosive in the underwater explosion

Table 5 Net-bubble energy of reactive materials

Initiation Energy (kJ)	0.2*	0.32	0.44	0.56	0.68**	0.88	1.06	1.42	1.78
Emulsion explosive	0.04	0.56	5.43	6.81	6.49	—	7.31	—	7.34
PETN (2g)	4.62	4.61	4.49	4.65	4.97	—	—	—	—
Black powder	0.06	0.24	1.33	1.57	1.80	—	—	—	—
m-DNB (crude)	—	—	0.18	0.30	0.45	0.28	0.44	1.78	—
m-DNB (fine)	—	0.00	0.00	0.74	1.17	0.68	2.07	4.76	8.12
ADCA	—	—	—	—	0.27	—	0.44	0.45	1.01
AIBN	0.19	0.35	0.58	0.75	0.73	—	—	—	—

\* : No.0 detonator, \*\* : No.6 detonator

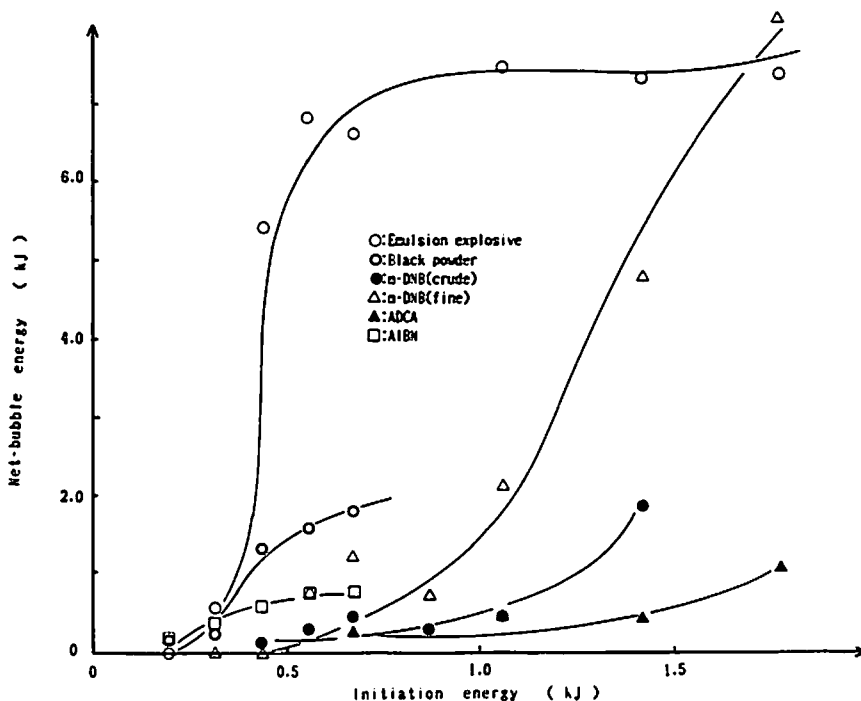


Fig. 4 Plot of net-Eb vs. initiation energy in the variable initiator test with underwater explosion test

や高いようにも見えるが、水槽の構造、薬種等の違いによっても考えられている。水槽の強度限界を越えなければ、検定曲線を予め作成しておき、直線部分から外れた部分の薬量における気泡エネルギーを求めることも可能であろう。また0~6号雷管を用いて2.0gのペントリットを起爆した際に発生する気泡エネルギーは、試料容器にタルクを加えた場合よりも増加率が大きくなった。これはタルクによるエネルギー吸収の差とも考えられるが今の所ははっきりしたことは言えない。

### 3.3 水中爆発を用いた可変起爆剤衝撃感度試験

水中爆発を用いた可変起爆剤試験の結果及び起爆エ

ネルギーに対する気泡エネルギーのプロットをそれぞれTable 5及びFig. 4に示す。弾動臼砲、弾動振子及び砂中爆発を用いた可変起爆剤試験の結果から、黒色火薬、AIBN及びm-DNBは伝爆性のあることが分かっている。ADCAは種々の方法で伝爆性のないことが確かめられている<sup>8)</sup>。エマルジョン爆薬は産業用爆薬であるから当然伝爆性がある。ここで得られた結果から衝撃感度は、PETN>エマルジョン爆薬>黒色火薬>AIBN>粉状m-DNBの順となった。粒状m-DNBの感度曲線は、粉状品よりも高エネルギー側にシフトしており、粉状品よりも粒状品の方が感度の低いことを示している。ADCAは伝爆性がないので

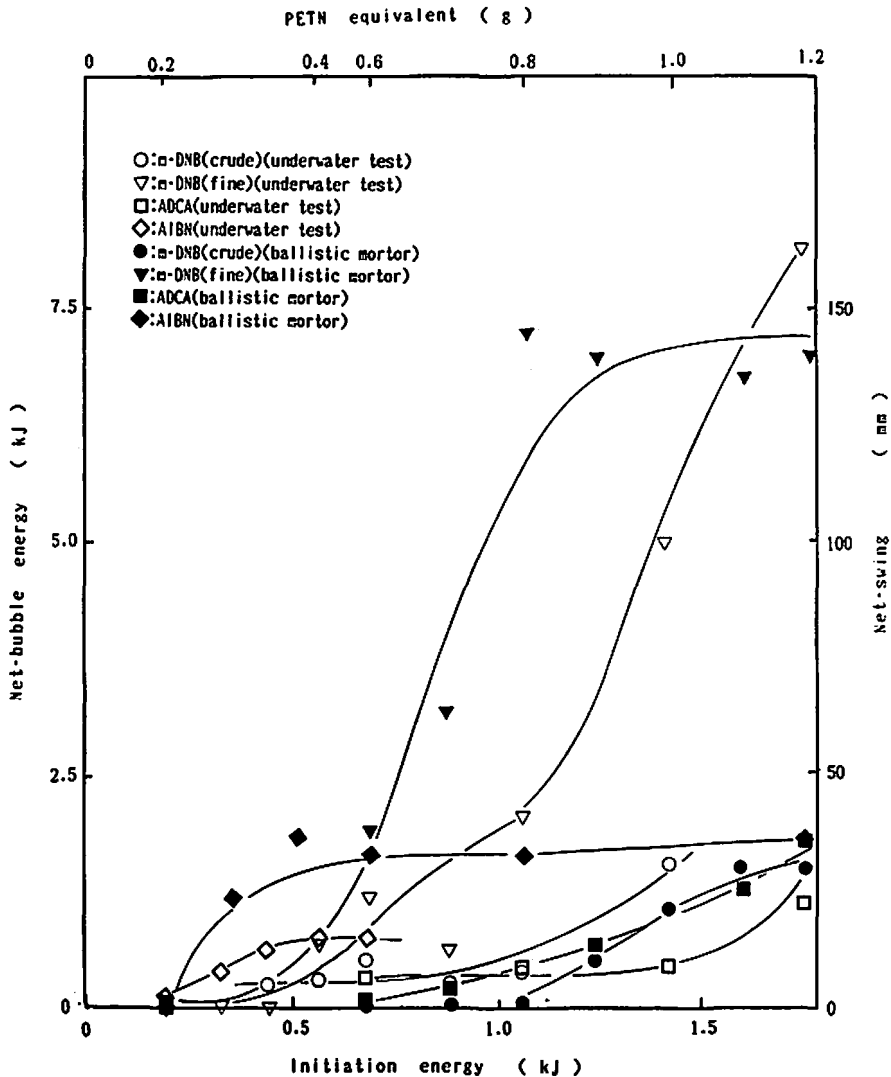
衝撃感度を論じても意味がない。

3.4 弾動白砲を用いた可変起爆剤試験と水中爆発を用いた可変起爆剤試験の比較

弾動白砲を用いた可変起爆剤試験と水中爆発を用いた可変起爆剤試験では、起爆剤の強さの表示法が異なる為、完全な対応をとることは困難である。しかし、

Table 6 The relation net-swing of ballistic mortar and net-Eb

MATERIALS	net-swing (mm)	net-Eb (kJ)	ratio (mm/kJ)
PETN	211	12.0	17.6
m-DNB (fine)	140	8.12	17.2
m-DNB (crude)	30	1.78	16.9
Emulsion explosive	157	6.85	22.9
No. 6-Detonator	30	1.06	28.3
Black powder	75	1.7	44.1
AIBN	36	0.72	50.0



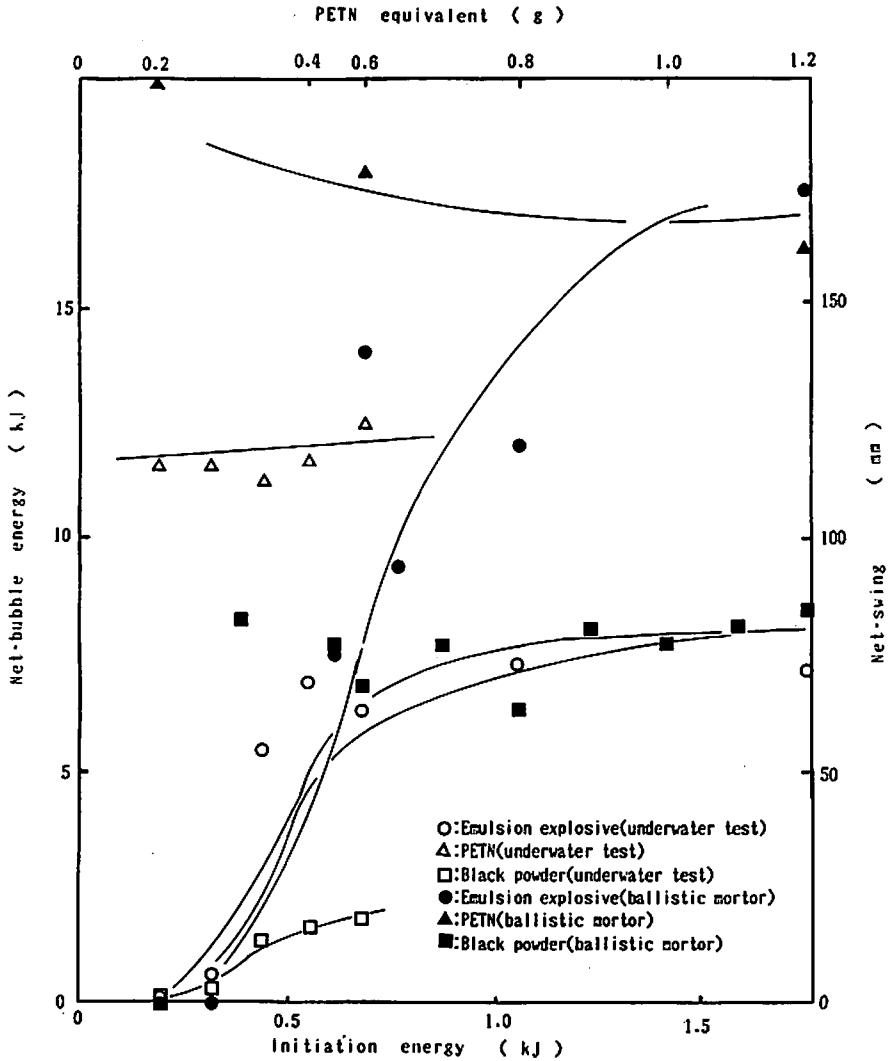


Fig. 5 Plot of net- $E_b$  and net-swing against initiation energy

近似的に起爆剤の強さを対応させることにより実験結果を比較することができる。Table 6に同一物質5gが完爆した場合の弾動臼砲の正味の振れ幅(net-swing)及び水中爆発の正味気泡エネルギー(net- $E_b$ )の値及びその比を示す。また、弾動臼砲を用いた可変起爆剤試験における正味の振れ幅とPETN当量のプロット及び水中爆発を用いた可変起爆剤試験における正味の気泡エネルギーと起爆エネルギーのプロットをFig. 5に示した。黒色火薬、AIBN、*m*-DNB及びエマルジョン爆薬については、両法とも同じような感度曲線を示したが、弾動臼砲の正味の振れ幅と水中爆発の正味の気泡エネルギーの比は一定にはならなかった。これまでの実験の範囲では、高爆速の物質程この比が小さ

くなるという傾向が現れている。この理由としては弾動臼砲の場合、高爆速の爆発物はそのエネルギーの一部が衝撃波となって周囲の壁に吸収されてしまい、弾丸を飛ばすために有効に利用されていない為であろうと考えられている。水中爆発の場合は、高爆速の爆薬でも衝撃波エネルギーの一部は爆源付近である程度気泡エネルギーに変化することが考えられる。6号雷管の場合は、添装薬の爆発エネルギーの一部が雷管管体及び試料容器の破壊に使われるので見かけ上低爆速の爆薬に対応する比が得られたものと思われる。

#### 1. まとめ

- (1) 起爆エネルギーを変化させて、5gの試料を水中で爆発させ、生成する気泡エネルギーを測定す

ることにより試料の衝撃感度を測定することが出来た。水中での可変起爆剤試験の結果は弾動臼砲を使用した場合と類似の結果であった。

(2) 弾動臼砲試験における正味振幅と水中爆発より得られた気泡エネルギー ( $E_d$ ) との比は爆発物の性質により異なることが分かった。本実験においては、高爆速の物質ほど小さな比を与えた。

#### 文 献

- 1) 村永浩太郎, 松永猛裕, 田村昌三, 安部隆幸, 吉田忠雄, 「弾動臼砲の性能と応用(X)弾動臼砲を用いた爆発性物質の衝撃感度の測定」, 工業火薬, 46, 162(1985)
- 2) T. Yoshida, K. Muranaga, T. Matsunaga and M. Tamura, "Evaluation of Explosive Properties of Energetic Materials using Mk III Ballistic Mortar", Annales des Mines, Janvier-Fevrier, 46 (1986)

- 3) 吉田忠雄, 田村昌三, 松永猛裕, 村永浩太郎, 蔵持 勇, 「爆発性物質の衝撃感度と新しい試験法」, 化学品安全, 4, 36(1986)
- 4) 松永猛裕, 田村昌三, 岩間 彬, 斉藤照光, 吉田忠雄「HMX入りコンボジット推進薬の衝撃感度と伝爆性評価の研究(II)」, 「砂中爆発法及び水中爆発法による評価」, 工業火薬, 48, 105(1987)
- 5) R. H. Cole, "Underwater Explosions", Dover Publ. Inc.(1965)
- 6) 田中一三, 行沼仙三, 「水中爆発ガス球脈動周期のマイクロホンによる測定」, 工業火薬, 47, 196(1986)
- 7) 田中一三, 「水中爆発におけるガス球挙動(II)水槽壁の効果とガス球の沈下」, 工業火薬, 40, 306(1979)
- 8) 吉田忠雄編著, 「化学薬品の安全」, 大成出版社(1982)

---

### Evaluation of Explosive Properties with Underwater Explosion ( I )

#### Shock Sensitivity by the Variable Initiator Test

by Yoshiaki KANEKO\*, Ayumu KIMURA\*\*, Nobuo YOSHIDA\*\*,  
Masamitsu TAMURA\*\*\* and Tadao YOSHIDA\*\*\*

The variable initiation test for evaluating shock sensitivity of explosives and other self-reactive substances was tried using the underwater explosion. The results with the underwater explosion were similar to those with a ballistic mortar. The extent of explosion by initiation with initiators of various strength was estimated from the bubble energy of the underwater explosion. As the bubble energy is nearly proportional to the explosion energy for most explosive materials and easy to measure accurately, the method using the underwater explosion may be as useful as that with the ballistic mortar. The explosion powers obtained with both methods were not necessarily proportional to each other when the tested materials were different.

(\*Asa Laboratory, Explosives Division, Nippon Kayaku CO., LTD., Sanyo-cho, Asa-gun, Yamaguchi-ken 757, Japan

\*\*Himeji Branch, Explosives Research Laboratory, Explosives Division, Nippon Kayaku CO., LTD., Toyotomi, Himeji, Hyogo-ken 679-21, Japan

\*\*\*Faculty of Engineering, Tokyo University, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan)