

ンプルピンは、Mk III 弾動臼砲を用いた可変起爆剤試験³⁾の際に起爆剤および雷管を入れるために用いたポリエチレン製内筒および試料容器と同じものをそれぞれ用いた。

水中小型ギャップ試験のギャップには、厚さ1mmまたは2mmのポリエチレン板を直径6.5mmのポンチで打ち抜いたカードを所定の厚さになるように重ねて用いた。

試料体の防水は、試料体全体をパラフィルムM(American Can Co.製)で包むことによって行った。

2.3 試験設備

実験に使用した水槽は、細谷火工機技術開発センターに付属するものである。その形状は、底部の直径が3m、上部の直径が8m、深さ2.5mの逆円錐台形の水槽の上に、直径10m、深さ2mの円筒形の水槽がつけられた形で、合計の深さが4.5mである。

水槽の上には、水槽のほぼ中央を通して橋が架けられており、試料体および圧力センサーはこの橋から吊り下げた。

2.4 試験手順

水中小型ギャップ試験の手順を以下に示す。

- (1) ポリエチレン製チューブに0.3gの試料を秤り入れる。
- (2) 試料の上から所定の厚さのギャップ長になるように、適当な枚数のポリエチレンカードを入れる。
- (3) 試料またはカードの上から所定の雷管を挿入し、抜けないように脚線を結びつける。

(4) 試料体全体をパラフィルムMで包んで防水する。

(5) 雷管を結線し、試料体の中心が水深1mの位置になるように沈める。

(6) 測定系の準備が整ったら発破器を用いて起爆する。

水中可変起爆剤試験の手順を以下に示す。

- (1) 内容積10mlまたは15mlのガラス製サンプルビンに5gの試料を秤り入れる。
- (2) ガラス製サンプルビンの蓋に直径7mmの孔をあけ、ポリエチレン製チューブを挿入する。このとき、ガラス製サンプルビンに蓋をした状態で、ポリエチレン製チューブの一部がサンプルビンの内部の試料中に挿入されるようにする。
- (3) ポリエチレン製チューブに所定の雷管を挿入し、抜けないように脚線を結びつける。
- (4) 以下は、水中小型ギャップ試験と同じである。できあがった試料体を図1に示す。

2.5 計測

水中爆発で発生する圧力波形の検出には、トルマリンゲージ(PCB Piezotronics, Inc.製, 138A10)を用いた。トルマリンゲージの位置は水深1mとし、トルマリンゲージの先端を試料体に向け、センサー部を試料体との距離が1mまたは2mとなるようにした。この距離によって試験の結果に影響はないが、距離が短い方が衝撃波形の解像度を高めることができるので、はじめ2mで測定していたものを1mに近づけた。

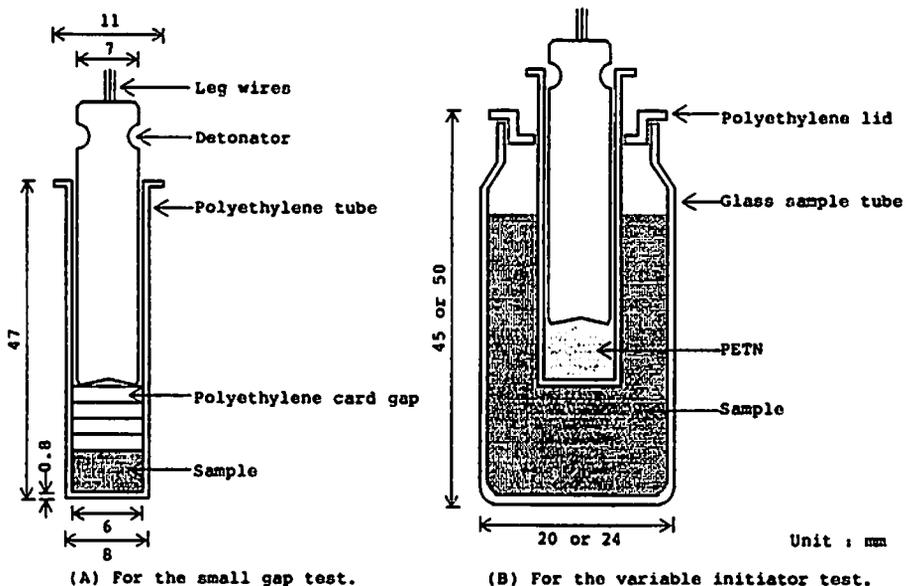


Fig. 1 Sample assemblies for the underwater small gap and variable initiator tests.

検出された圧力波形はパワーユニット (PCB Piezotronics, Inc. 製, 480D06) を通して, 水中衝撃波形の場合は, 直接, A/D 変換器 (Autonics 製, S 210) を介して, 爆発気泡の脈動波形の場合は, 一旦データレコーダー (TEAC 製, MR-10) に記録してから A/D 変換器を介して, マイクロコンピュータ (NEC 製, PC-9801 VX21) に取り込み, 解析した。

2.6 解析

水中衝撃波の解析では, パラメータとして最大圧力 (P_{max} : kg/cm²) と水中衝撃波エネルギー (E_s : kJ) を用いた。

E_s は, 次の式を基にし, マイクロコンピュータを用いて数値積分を行って求めた。

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{\rho_w C_w} \int_0^{\theta} P^2 dt$$

ここで, R は爆源から測定点までの距離, ρ_w は水の密度, C_w は水中の音速である。 θ は水中衝撃波の圧力-時間曲線を指数減衰式にあてはめて得られる時間定数であり, 衝撃波の減衰定数と呼ばれ, 衝撃発生から衝撃波の圧力が P_{max} の $1/e$ となるまでの時間である。

気泡エネルギーは, 気泡脈動波を解析して爆発気泡の脈動第 1 周期 (T_b : ms) を求め, 下の式を用いて爆発気泡エネルギー (E_b : kJ) を計算する。

$$E_b = 6.84 \times 10^{-5} \times P_0^{2.5} \times T_b^3$$

ここで, P_0 (bar) は試料の置かれた位置の静圧である。こうして得られた爆発気泡エネルギーから雷管 (ポリエチレン製チューブまたはガラス製サンプルビン入り) によるエネルギーを差し引いた正味の気泡エネルギー (Net- E_b : kJ) を求めた。

3. 結果と考察

3.1 基礎データ

基礎的な, 雷管および起爆剤集合体の水中爆発実験結果を表 1 に示した。水中小型ギャップ試験および水中可変起爆剤試験に必要な基礎データとしては, それぞれの試料容器中で雷管を単独で起爆したときの気泡エネルギーと衝撃波エネルギーが必要である。これらの値は表 1 に示したのから, 実験回数が 1 回のもはその値を, 複数実験したものはそれらの平均値を採用した。

ポリエチレン製チューブ入り 0 号雷管:

$$E_b = 0.32 \text{ kJ}, E_s = 0.11 \text{ kJ}$$

ポリエチレン製チューブ入り 6 号雷管:

$$E_b = 1.14 \text{ kJ}, E_s = 0.42 \text{ kJ}$$

ガラス製サンプルビン入り 0 号雷管:

$$E_b = 0.22 \text{ kJ}, E_s = 0.04 \text{ kJ}$$

ガラス製サンプルビン入り 1 号雷管:

$$E_b = 0.34 \text{ kJ}, E_s = 0.06 \text{ kJ}$$

ガラス製サンプルビン入り 2 号雷管:

$$E_b = 0.52 \text{ kJ}, E_s = 0.12 \text{ kJ}$$

ガラス製サンプルビン入り 3 号雷管:

$$E_b = 0.66 \text{ kJ}, E_s = 0.17 \text{ kJ}$$

ガラス製サンプルビン入り 6 号雷管:

$$E_b = 0.83 \text{ kJ}, E_s = 0.21 \text{ kJ}$$

0 号雷管および 6 号雷管を用いたときの PETN の薬量効果を図 2 に示した。0 号雷管を用いたときの PETN 1 g 当りの気泡エネルギーおよび衝撃波エネルギーを最小自乗法を用いて解析したところ, それぞれ, 2.68 kJ および 1.03 kJ, 6 号雷管を用いたときは, それぞれ, 2.49 kJ および 1.02 kJ となった。

0 号雷管を用いた実験では, E_b -PETN 薬量曲線が PETN 薬量の少ない領域で湾曲している。これは, PETN 薬量の少ない領域では発生する気泡エネルギーの一部がポリエチレン製チューブの破壊に使われるためと考えられる。したがって, PETN 薬量が多い領域 (0.3 g 以上) についてのみ同様に解析すると, PETN 1 g 当りの気泡エネルギーは 2.49 kJ となり, 6 号雷管を用いた場合と非常に近い値となる。6 号雷管を用いた実験では, 6 号雷管自身が十分な添装薬 (テトリル 0.4 g) を含んでいるためこのような傾向がでないと考えられる。

3.2 水中小型ギャップ試験

水中小型ギャップ試験の結果を表 2 に示した。図 2 に見られるように, 1 g 以下の PETN 薬量で爆・不爆の判定ができることがわかったので, 秤量精度および取り扱いの安全性を考慮して, 起爆薬を除く爆発物の水中小型ギャップ試験試料量は 0.3 g とした。

100% PETN, 水希釈 PETN および 100% TNT について, 0 号雷管を用いた水中小型ギャップ試験の結果を図 3 に示した。試験結果の表示は, 横軸にギャップ長の対数, 縦軸に正味の気泡エネルギーをとることとした。この試験における 100% PETN の不爆点は, ギャップ長 18 mm, 90% および 80% PETN のそれはそれぞれ 4 mm および 2 mm であった。100% TNT のそれは 5 mm であった。

内径 12.4 mm のガラス管と Mk III 弾動白砲を用いた従来の小型ギャップ試験で 100% PETN の不爆点はギャップ長 7 mm, 100% TNT は 2 mm であった³⁾。今回の試験では, 同じ物質を不爆とするために必要な最短のギャップ長が長くなっている。これは, 従来の小型ギャップ試験のギャップ直径が 12 mm であったのに対し, 今回の試験は 6.5 mm とギャップ直径が小さいことが原因と考えられる。なぜならば, 雷管の爆発によって試料に与えられる衝撃波エネルギーをギャップの単位面積当りに換算すると, 今回の試験の方が従来の試験に比

Table 1 Results of the underwater explosion for detonators and initiator assemblies.

No.	Sample	Mass [g]	Det. No.	Pmax [kgf/cm ²]	θ [μ s]	Es [kJ]	Tb [ms]	Eb [kJ]
1	No.3 Det.			25.0	18	0.51	23.10	1.10
2	No.6 Det.						22.70	1.04
3	No.6 Det.						22.75	1.05
4	No.6 Det.						22.75	1.05
5	No.6 Det.						22.75	1.05
6	No.6 Det.			11.0	22	0.41	22.75	1.05
7	No.6 Det.						22.95	1.08
8	No.6 Det.			11.6	20	0.41	22.85	1.06
9	No.6 Det.			11.7	23	0.45	22.85	1.06
10	No.6 Det.			11.8	22	0.43	22.85	1.06
11	No.6 Det.			24.9	27	0.51		
12	No.6 Det.			26.2	19	0.53		
13	No.6 Det.						23.00	1.08
14	No.6 Det.			21.5	24	0.44		
15	No.6 Det.			20.1	22	0.38	23.20	1.11
16	No.6 Det.			28.4	15	0.51	22.95	1.08
17	No.0 Det. in PE tube			9.1	56	0.11	15.25	0.32
18	No.2 Det. in PE tube			*15.1	37	*0.27	20.50	0.77
19	No.3 Det. in PE tube			22.9	22	0.44	22.15	0.97
20	No.6 Det. in PE tube			11.0	24	0.41		
21	No.6 Det. in PE tube			10.7	25	0.39	23.25	1.12
22	No.6 Det. in PE tube			10.9	26	0.42	23.25	1.12
23	No.6 Det. in PE tube			11.2	24	0.45	23.65	1.18
24	No.0 Det. in GS tube						13.60	0.22
25	No.0 Det. in GS tube			2.7	36	0.04		
26	No.0 Det. in GS tube			4.3	53	0.04		
27	No.1 Det. in GS tube			3.3	49	0.06	15.65	0.34
28	No.2 Det. in GS tube			5.7	23	0.12	18.00	0.52
29	No.3 Det. in GS tube			5.7	39	0.15		
30	No.3 Det. in GS tube			12.5	43	0.17		
31	No.3 Det. in GS tube			13.6	49	0.19	19.55	0.66
32	No.6 Det. in GS tube						21.20	0.85
33	No.6 Det. in GS tube			7.5	22	0.20		
34	No.6 Det. in GS tube			14.0	46	0.21		
35	No.6 Det. in GS tube			13.2	46	0.21	20.85	0.81
36	PETN 100% in PE tube	0.1	0	16.6	19	0.18	19.35	0.64
37	PETN 100% in PE tube	0.2	0	22.4	20	0.31	21.95	0.94
38	PETN 100% in PE tube	0.3	0	10.9	23	0.43	24.10	1.25
39	PETN 100% in PE tube	0.6	0	30.6	24	0.71	28.10	1.97
40	PETN 100% in PE tube	0.8	0	35.3	21	0.93	30.40	2.50
41	PETN 100% in PE tube	0.1	6				24.85	1.37
42	PETN 100% in PE tube	0.3	6	13.3	25	0.65	27.55	1.86
43	PETN 100% in PE tube	0.5	6	15.3	26	0.84	29.80	2.35
44	PETN 100% in PE tube	1.0	6	18.7	25	1.43	34.40	3.62

* : Range over, Det. : detonator, PE tube : polyethylene tube, GS tube : glass sample tube.

べて大きく、試料が不爆となるような大きさにまで衝撃波エネルギーを減衰させるために必要なギャップ長も長いからである。

6号雷管を用いた水中小型ギャップ試験は、ギャップ長がかなり長く必要で、PETNの不爆点を求めるまでに至らなかった。

3.3 水中可変起爆剤試験

70%および60%PETNについての水中可変起爆剤試験の結果を表3に示した。70%PETNについては、6号雷管を用いたときに管径6mmφの塩ビ管中で伝爆することが前報⁹⁾でわかっている。今回の試験条件はそれより爆ごうし易いので、弱雷管についてのみ試験を行った。

70%PETNは、3号雷管以下の雷管で不爆となった。したがって、3号雷管による起爆に相当する衝撃が、不爆となる最大の衝撃である。60%PETNは、3号雷管以下で不爆、6号雷管に起爆剤としてPETN0.6gを加えた場合には起爆された。6号雷管のみでは3回試験を行ったが、1回は気泡エネルギーが採れず、1回は不爆、1回は起爆された。衝撃波エネルギーも参考にすると、2回が不爆、1回が起爆されたことがわかる。60%PETNは、かなり水分が多いので混合が不十分となる可能性がある。実際は、他の試験では明らかにPETNと水が分離して不合理な結果が得られた例がある。したがって、6号雷管での試験結果の再現性が良くない原因は、6号雷管による起爆に相当する衝撃が爆・不爆の境界である可能性もあるが、単に試料の混合状態が良くないことにあるかも知れない。この点については、PETNと分離しない希釈剤を用いて試験をすることで確認できるであろう。

3.4 衝撃波エネルギーと気泡エネルギー

今回の試験では正味の気泡エネルギーを判定の基準として用いたが、正味の衝撃波エネルギーを用いても判定することができる。しかし、非爆ごう性の試料は衝撃波を発生しないので適用できない。また、衝撃波エネルギーは、衝撃波の波形と積分区間の採り方によって変化するので気泡エネルギーに比べて精度が悪い。ただし、気泡エネルギーの測定に失敗することもあるので衝撃波エネルギーは記録しておいた方がよい。

4. まとめ

0号雷管を用いた水中小型ギャップ試験を行い、PETNとその水希釈品およびTNTの不爆点を求めることができた。その結果、試料を不爆とするために必要な最短のギャップ長は、MkⅢ弾動白砲を用いた従来の小型ギャップ試験より長くなった。この原因としては、水中小型ギャップ試験の方がギャップの直径が

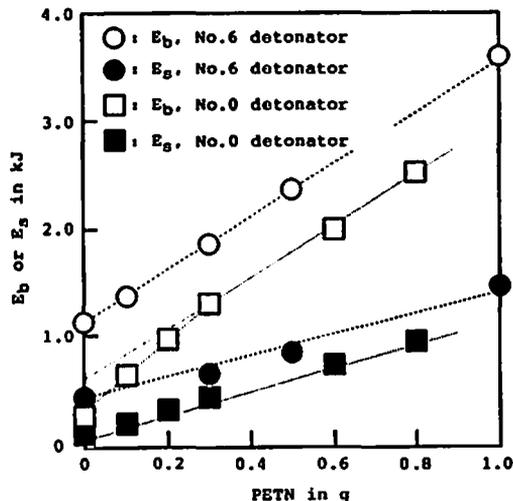


Fig. 2 Plots of E_b and E_g vs. weight of PETN in the underwater explosion of No.0 and No.6 detonators with PETN.

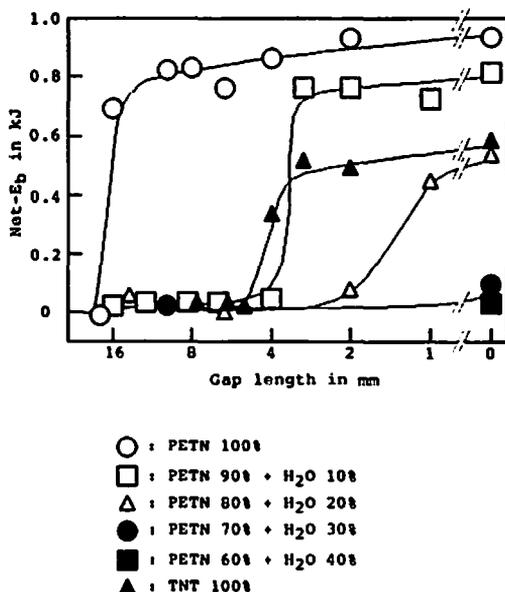


Fig. 3 Plot of $Net-E_b$ vs. logarithm of gap length in the underwater small gap test.

小さいために単位面積当りの衝撃波エネルギーが大きく、衝撃波の距離減衰が小さいことが考えられる。

また、MkⅢ弾動白砲と同様の試料体を用いた水中可変起爆剤試験も可能であることがわかった。

文献

- 1) 吉田忠雄, 田村昌三, 吉田正典, 「打撃感度試験」, 工業火薬, 39, 115 (1978)

Table 2 Results of the underwater small gap test.
Mass of Sample=0.3g

No.	Sample	Gap Length [mm]	Det. No.	Pmax [kgf/cm ²]	θ [μ s]	Es [KJ]	Net-Eb [KJ]	Tb [ms]	Eb [KJ]	Net-Eb [KJ]
1	PETN 100%	18	0	*7.6	52	*0.09				
2	PETN 100%	18	0	10.7	25	0.08	-0.03	15.15	0.31	-0.01
3	PETN 100%	16	0	27.7	22	0.57	0.46	22.50	1.01	0.69
4	PETN 100%	16	0	15.1	28	0.32	0.21	22.50	1.01	0.69
5	PETN 100%	14	0	22.2	24	0.44	0.33			
6	PETN 100%	12	0	23.1	22	0.50	0.39			
7	PETN 100%	10	0	20.4	32	0.47	0.36			
8	PETN 100%	10	0	9.8	29	0.41	0.30	23.40	1.14	0.82
9	PETN 100%	8	0	11.8	23	0.46	0.35	23.50	1.15	0.83
10	PETN 100%	6	0	10.8	26	0.42	0.31	23.00	1.08	0.76
11	PETN 100%	4	0	10.8	23	0.44	0.33	23.70	1.18	0.86
12	PETN 100%	2	0	11.0	24	0.44	0.33	24.10	1.25	0.93
13	PETN 100%	0	0	10.9	23	0.43	0.32	24.10	1.25	0.93
14	PETN 90%	16	0	10.9	30	0.11	0.00	15.65	0.34	0.02
15	PETN 90%	12	0	11.4	30	0.12	0.01	15.85	0.35	0.03
16	PETN 90%	8	0	12.4	28	0.13	0.02	15.95	0.36	0.04
17	PETN 90%	6	0	10.8	28	0.11	0.00	15.90	0.36	0.04
18	PETN 90%	4	0	11.4	24	0.12	0.01	16.00	0.36	0.04
19	PETN 90%	3	0	22.5	19	0.35	0.24	23.00	1.08	0.76
20	PETN 90%	2	0	21.8	24	0.43	0.32	23.00	1.08	0.76
21	PETN 90%	1	0	23.6	19	0.37	0.26	22.70	1.04	0.72
22	PETN 90%	0	0	24.2	18	0.49	0.38	23.35	1.13	0.81
23	PETN 80%	14	0	12.3	26	0.13	0.02	16.05	0.37	0.05
24	PETN 80%	6	0	11.5	25	0.11	0.00	15.70	0.34	0.02
25	PETN 80%	2	0	11.8	20	0.12	0.01	16.30	0.39	0.07
26	PETN 80%	1	0	19.1	15	0.28	0.17	20.40	0.76	0.44
27	PETN 80%	0	0	15.1	27	0.25	0.14	21.35	0.87	0.55
28	PETN 70%	10	0	11.5	23	0.12	0.01	15.85	0.35	0.03
29	PETN 70%	0	0	13.1	17	0.13	0.02	16.45	0.40	0.08
30	PETN 60%	0	0	15.1	17	0.18	0.07			
31	PETN 60%	0	0	12.2	23	0.12	0.01			
32	PETN 60%	0	0	13.1	21	0.13	0.02	15.65	0.34	0.02
33	TNT 100%	8	0	5.4	25	0.11	0.00	15.80	0.35	0.03
34	TNT 100%	6	0	10.9	29	0.11	0.00	15.85	0.35	0.03
35	TNT 100%	5	0	9.4	31	0.09	-0.02	15.55	0.33	0.01
36	TNT 100%	4	0	5.8	33	0.18	0.07	19.30	0.64	0.32
37	TNT 100%	3	0	12.8	29	0.21	0.10	20.95	0.82	0.50
38	TNT 100%	2	0	8.3	20	0.25	0.14	20.75	0.80	0.48
39	TNT 100%	0	0	9.1	24	0.29	0.18	21.50	0.88	0.56
40	PETN 95%	20	6	12.9	29	0.77	0.35	26.35	1.63	0.49
41	PETN 95%	14	6	11.3	28	0.67	0.25	26.75	1.70	0.56
42	PETN 95%	10	6	12.1	26	0.72	0.30	27.55	1.86	0.72
43	PETN 95%	0	6	13.9	23	0.68	0.26	27.70	1.89	0.75
44	PETN 90%	20	6	11.2	38	0.64	0.22	27.10	1.77	0.63
45	PETN 90%	10	6	15.6	19	0.76	0.34	27.15	1.78	0.64
46	PETN 90%	0	6					27.50	1.85	0.71
47	PETN 85%	10	6	15.0	19	0.76	0.34	27.50	1.85	0.71
48	PETN 85%	6	6	13.9	26	0.68	0.26	27.40	1.83	0.69
49	PETN 85%	0	6	13.6	26	0.69	0.27	27.95	1.94	0.80
50	PETN 80%	0	6	13.6	24	0.67	0.25	27.70	1.89	0.75

*: Range over. Det. : detonator.

Table 3 Results of the underwater variable initiator test.
Mass of sample =5.0g

No. Sample	Initiator	Pmax [kgf/cm ²]	θ [μ s]	Es [KJ]	Net-Eb [KJ]	Tb [ms]	Eb [KJ]	Net-Eb [KJ]
1	PETN 70% No.1 Det.					16.85	0.43	0.09
2	PETN 70% No.2 Det.	11.5	34	0.15	0.03	18.70	0.58	0.06
3	PETN 70% No.3 Det.	14.3	44	0.23	0.06	20.65	0.78	0.12
4	PETN 60% No.0 Det.					13.75	0.23	0.01
5	PETN 60% No.0 Det.	7.0	30	0.05	0.01	13.60	0.22	0.00
6	PETN 60% No.1 Det.	8.9	45	0.09	0.03	16.05	0.37	0.03
7	PETN 60% No.2 Det.	13.1	34	0.20	0.08	19.05	0.62	0.10
8	PETN 60% No.3 Det.	15.3	22	0.22	0.05	20.30	0.74	0.08
9	PETN 60% No.6 Det.	15.6	26	0.20	-0.01			
10	PETN 60% No.6 Det.	*37.5	47	*2.70		41.60	6.41	5.58
11	PETN 60% No.6 Det.	16.7	44	0.27	0.06	21.45	0.88	0.05
12	PETN 60% No.6 Det.+ PETN 0.6g	*37.9	64	*3.50		45.50	8.38	

*: Range over, Det. : detonator.

- 2) 松永猛裕, 村永浩太郎, 伊藤 葵, 田村昌三, 蔵持 勇, 吉田忠雄, 「Mk III 弾動臼砲の性能と応用(X I), 弾動臼砲を用いた小型カードギャップ衝撃感度試験法」, 工業火薬, 46 (5), 327 (1985)
- 3) 村永浩太郎, 松永猛裕, 田村昌三, 安部隆幸, 吉田忠雄, 「Mk III 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法」, 工業火薬, 46 (3), 162 (1985)
- 4) 吉沢二千六, 三上吉勝, 金子良昭, 松永猛裕, 田村昌三, 蔵持 勇, 吉田忠雄, 「酸化剤の反応性と危険性の評価(N), 酸化剤組成物の落球式打撃感度試験」, 安全工学, 26, 283 (1987)
- 5) 吉田忠雄, 田村昌三編著, 「反応性化学物質および火工品の安全」, 大成出版社(1988)
- 6) R. H. Cole, "Underwater Explosions", Dover Publ. Inc. (1965)
- 7) 金子良昭, 木村 歩, 吉田信生, 田村昌三, 吉田忠雄, 「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」, 工業火薬, 49, 176 (1988)
- 8) 細谷文夫, 和田有司, 松永猛裕, 金子良昭, 劉榮海, 田村昌三, 吉田忠雄, 「水中爆発を用いた爆発性の評価(N), 棒状装薬の水中爆発の性質と伝爆性の推定」, 工業火薬, 投稿中

Evaluation of Explosive Properties by Underwater Explosion (Ⅵ)
Underwater Small Gap Test

by Yuji WADA*, Takehiro MATSUNAGA**, Rong-Hai LIU***,
Yoshiaki KANEKO****, Fumio HOSOYA*****, Masamitsu TAMURA*
and Tadao YOSHIDA*

The small gap test with No.0 detonator by using the underwater explosion was tried for evaluating the shock sensitivity of explosives. The shortest gap lengths of 100% PETN, 90% and 80% PETN diluted with water, and 100% TNT which do not propagate detonation could be evaluated to be 18mm, 4mm, 2mm, and 5mm respectively. The shortest gap lengths for not initiating detonation in this test were longer than those in the former small gap test using the Mk III ballistic mortar, because the gap diameter in this test was smaller than in the former, in other words, the shock energy per unit area in this test was bigger than in the former.

The underwater variable initiator test using the same sample assembly as the variable initiator test using the Mk III ballistic mortar could be applied to evaluate the shock sensitivity of less sensitive explosive materials.

(*Department of Reaction Chemistry, Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 3-1 Hongo 7-Chome, Bunkyo-ku, Tokyo113, Japan

**Safety Chemistry Division, National Chemical Laboratory for Industry, 1 Higashi 1-Chome, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken 305, Japan

***Chemical Engineering Department, East China Institute of Technology, 200 Xiao Ling Wei, Nanjing, China

****Asa Factory, Nippon Kayaku Co., Ltd., Sanyo-cho, Asa-gun, Yamaguchi-ken, Japan

*****Technology Development Center, Hosoya Kako Co., Ltd., 1847 Sugao-Osawa, Akigawa-shi, Tokyo 197, Japan)
