

棒状装薬の水中爆発の性質と伝爆性の推定

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**

PETN粉末, PETN含水粉末, TNT粉末及び導爆線の各柱状装薬の水中爆発を行って、それらの伝爆性を検討した。

柱状装薬の水中爆発衝撃波圧力波形と伝爆性については、長さ40mmの柱状装薬を用いて衝撃波ピークの幅及び衝撃波エネルギーの両者からかなりの精度で伝爆性を判定することが出来た。

柱状装薬の水中爆発気泡エネルギーによる伝爆性の推定については、3mmφ〜6mmφの塩ビ管に詰めた100%PETNの爆発気泡エネルギーは1.15〜2.02kJ/gという値が得られ、これらは衝撃波波形からこの条件で伝爆性があることがわかった。

また、4mmφ及び6mmφで40mm長さのTNT粉末は1.20及び1.03kJ/gの気泡エネルギーが得られたが、これも衝撃波波形から伝爆性があることがわかった。

水分40%のPETNは4mmφでも6mmφでも殆ど反応していないことがわかり、この実験の範囲ではここまで水を希釈すれば、かなり安全となることがわかった。

1. はじめに

水中爆発によって、爆発の結果生成する衝撃波のエネルギー及び気泡の脈動エネルギーを同時に測定することが出来る¹⁾。筆者らの一部は、先にこれらの方法を用いて固体ロケット推進薬の伝爆性の有無の判定²⁾、爆発性物質の衝撃感度の評価³⁾及び不安定物質の伝爆性の評価の予備的な研究⁴⁾⁵⁾を行ってきた。

ここでは、PETN粉末, PETN含水粉末, TNT粉末及び導爆線の棒状装薬の水中爆発実験を行った結果について報告する。

2. 実験

2.1 試料

PETN粉末は日本化薬製法の含水产品を一度真空乾燥し、それに所定量の水を加えて試料とした。粉状TNTは中国化薬製法の再結晶品を用いた。雷管は日本化薬製法の6号雷管を用いた。PETNの限界伝爆

径を求める実験では、棒状装薬作成のために軟質透明塩ビ管を用いた。Fig.1に示すように、底を防水テープ及びゴムテープで閉じた塩ビ管に粉末爆薬試料を入れ、これに6mm内径の塩ビ管を取りつけ、この塩ビ管に6号雷管を装着した(a)。細い試料管の場合はさらに中間のアダプターを間に介させた(b)。導爆線は日本カーリット製法の爆速測定用のもの(爆速6300 m/sec,

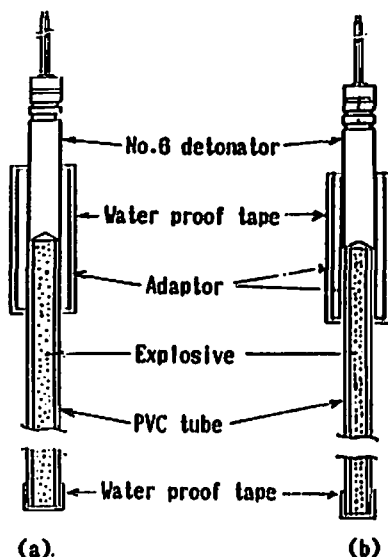


Fig. 1 Explosive sample assemblies.

昭和63年10月19日受理

*細谷火工株式会社技術開発センター

〒197 東京都秋川市菅生大沢 1847

TEL 0425-59-2578

**東京大学工学部反応化学科

〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

TEL 03-812-2111

***日本化薬株式会社火薬研究所

〒757 山口県厚狭郡山陽町大字郡 2300

TEL 08367-2-1234

****南京華東工学院

中国南京市考陵衛 200号

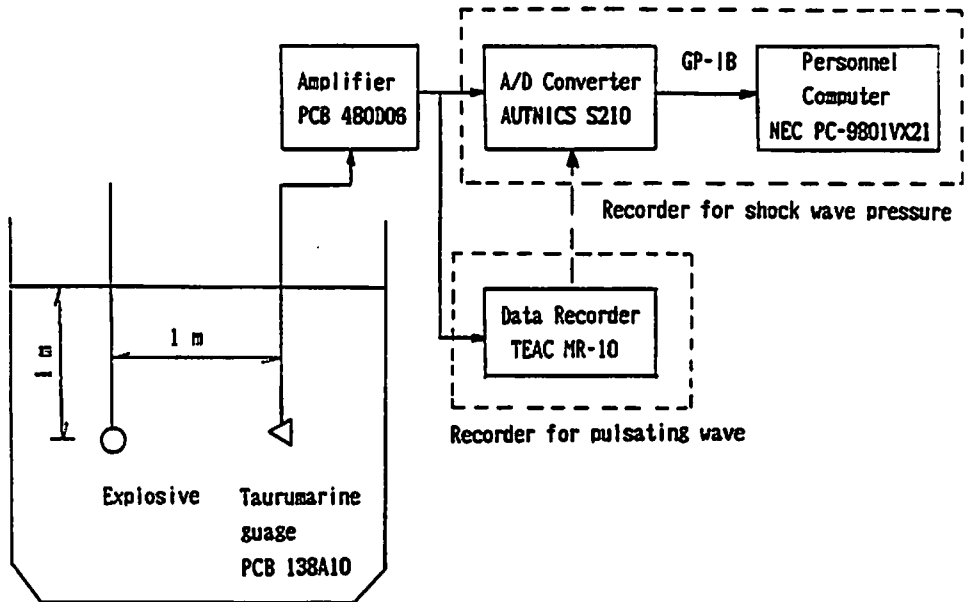


Fig. 2 Measuring system for underwater explosion experiment.

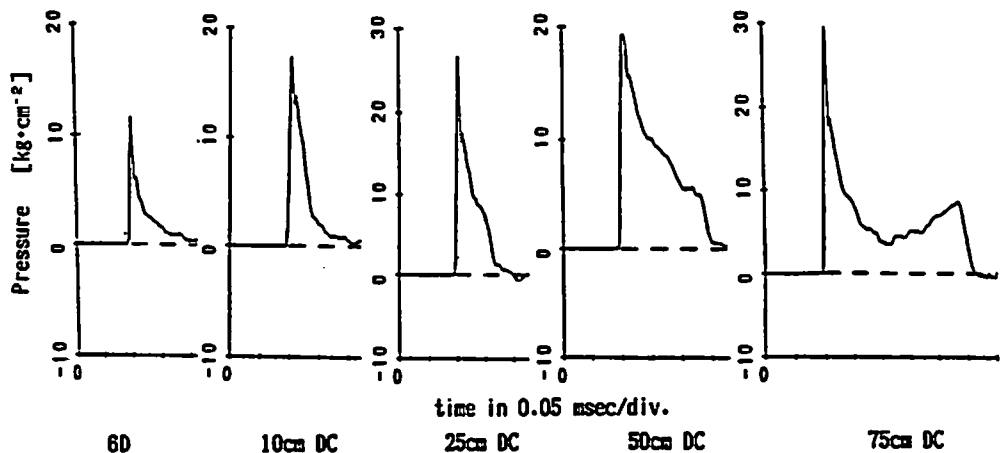


Fig. 3 Plot of pressure vs. time in the underwater explosion of No. 6 detonator (6D) and detonating cord (DC) of various lengths.

PETN 9.7g/m)を用いた。

2.2 実験場

実験に使用した池は細谷火工鋳技術開発センター所属のもので、上部円筒形、下部逆円錐台形のもので上部直径10m、底直径3m、水深4.5mである。その池にかかっている橋から、爆薬及び測圧センサーを吊り下げて実験を行った。

2.3 計測

水中爆発で発生した衝撃波及び気泡脈動の第一周期はPCB ピエゾエレクトロニクス社製のトリマリンゲージ(Blast Pressure Transducer 138A10)で検知し、

Fig.2に示す増幅器、データレコーダ、AD変換器及びパーソナルコンピューターを用いてデータを処理し、解析した。

2.4 実験手順

柱状爆薬をトルマリンゲージの測圧部から1m離れた水深1mの位置から下に吊り下げ、計測器の準備をして、上方から起爆した。

3. 結果と考察

3.1 結果

柱状装薬の水中爆発実験の結果をTable 1に示した。6号雷管についての同じ条件下での結果をTable 2に

Table 1 Results of underwater explosion of cylindrical charges initiated by detonator No.6.

Run No.	Sample	Tube Dia. [cm]	Tube Leng. [cm]	Sample wt. [g]	T_0 [ms]	E_0 [kJ]	θ [usec]	P_{max} [kg/cd]	E_1 [kJ]	Peak Width [ms]	Exper. Date
09	PETN 100%	5	10	1.5503	36.0	4.05	—	—	—	—	87/12/24
10	PETN 100%	5	20	2.8234	41.9	6.39	—	—	—	—	87/12/24
11	PETN 100%	5	30	4.7226	46.8	8.90	—	—	—	—	87/12/24
38	PETN 100%	3	10	0.57	29.05	2.13	50	12.8	0.98	0.040	88/01/16
39	PETN 100%	3	20	1.23	32.4	2.95	59	13.5	1.84	0.045	88/01/16
41	PETN 100%	3	30	—	34.35	3.52	63	19.0	2.27	0.078	88/01/16
40	PETN 100%	3	40	2.33	36.5	4.22	131	11.4	2.07	0.040	88/01/16
44	PETN 100%	3	40	2.31	36.50	4.22	127	11.6	1.98	—	88/01/16
12	PETN 100%	2	10	0.2472	30.50	2.46	—	—	—	—	87/12/24
13	PETN 100%	2	20	0.4677	26.85	1.68	—	—	—	—	87/12/24
14	PETN 100%	2	30	0.7612	28.30	1.97	—	—	—	—	87/12/24
15	PETN 100%	2	40	0.9645	28.80	2.07	—	—	—	—	87/12/24
31	PETN 90%	4	40	4.15	42.6	6.71	—	—	—	—	88/01/16
37	PETN 90%	3	40	2.22	33.9	3.38	85	11.8	1.41	—	88/01/16
30	PETN 80%	6	40	8.48	55.4	14.76	120	21.0	8.08	—	88/01/16
36	PETN 80%	4	40	4.27	43.0	6.90	119	15.7	3.76	—	88/01/16
43	PETN 80%	3	10	0.51	27.05	1.72	48	11.1	0.72	—	88/01/16
42	PETN 80%	3	20	0.92	29.70	2.27	48	12.1	0.90	—	88/01/16
45	PETN 80%	3	40	2.38	35.1	3.75	127	11.6	1.98	—	88/01/16
47	PETN 70%	6	40	16.229	60.0	18.75	87	74.3	13.87	—	88/01/26
43	PETN 70%	4	40	8.60	48.9	10.05	94	44.4	5.75	—	88/01/26
48	PETN 60%	6	40	12.882	31.7	2.77	20	48.6	1.70	—	88/01/26
49	PETN 60%	4	40	7.739	23.3	1.10	23	25.6	0.53	—	88/01/26
42	TNT 100%	6	40	7.7	47.0	9.01	101	30.8	3.29	—	88/01/26
49	TNT 100%	4	40	3.42	39.1	5.19	62	22.7	1.51	—	88/01/26
28	Dtnt. cord	—	200	—	—	—	—	—	—	—	88/01/16
29	Dtnt. cord	—	150	—	—	—	—	—	—	—	88/01/16
27	Dtnt. cord	—	100	—	—	—	—	—	—	—	88/01/16
33	Dtnt. cord	—	75	—	—	—	—	—	—	—	88/01/16
35	Dtnt. cord	—	75	—	—	—	33	29.6	4.82	0.230	88/01/16
26	Dtnt. cord	—	50	—	—	—	94	19.3	4.78	0.130	88/01/16
32	Dtnt. cord	—	25	—	37.8	4.69	34	26.7	3.44	0.050	88/01/16
34	Dtnt. cord	—	10	—	32.05	2.86	33	17.2	1.49	—	88/01/16

示した。

なお、6号雷管1本をプラスチック筒に入れたものの E_0 及び E_1 はそれぞれ1.09kJ及び0.41kJであった。

3.2 柱状装薬の水中爆発の衝撃波圧力波形

導爆線の圧力-時間曲線を雷管単独のそれと共にTable 3に示した。ピーク圧力は雷管単独に対して導爆線がつくと少し大きくなるが、導爆線が長くなってもそれ程大きくならない。50cmの導爆線では25cmの導爆線の場合よりピーク圧力が下がっているが、これは何らかの理由でピーク圧力が正確にとれなかったからであ

らう。

これに対してピーク幅は試料の長さと共に増加している。この様子を図4に示した。このピーク幅 Δt secは次のように表すことができる。

$$\Delta t = t_1 + t_2 - t_0 \quad (1)$$

ここに t_1 は爆ごうが長さ X m、爆速 D m/secの導爆線中を通過する時間、 t_2 は長さ X mの先端に爆ごうが到達してからそこで発生した衝撃波が $(1-X^2)^{1/2}$ m離れたトルマリンゲージに到達するまでの時間、そして、 t_0 は最初の雷管の爆発による衝撃波が1 m離れた

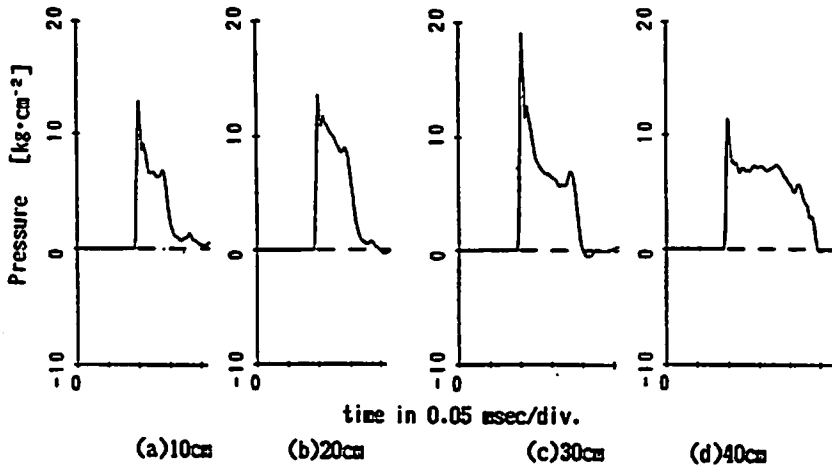


Fig. 4 Plot of pressure vs. time for the underwater explosion of PETN cylindrical charge in 3mm ϕ PVC tube.

Table 2 Calculated Δt .

Length of detonating cord X m	Velocity of detonating cord D m/sec	Sound velocity of water C_w m/sec	Peak width	
			calc. m sec	obs. m sec
0.25	6500	1465	0.059	0.050
0.25	6500	2200	0.052	0.050
0.50	6500	1465	0.158	0.130
0.50	6500	2200	0.131	0.130
0.75	6500	1465	0.285	0.230
0.75	6500	2200	0.226	0.230

トルマリンゲージに到達するまでの時間である。 Δt の計算結果を Table 2 に示した。水中の音速として 2200m/sec を採るとピーク幅の計算値と実験値は良い一致を示す。1 気圧の水中の音速は約 1500 m/sec であることが知られている。ここでは圧力波が先行圧力波に続いて進行するために音速が加速されたものであろう。

内径 3 mm の塩ビ管に乾燥 PETN 粉末を詰めた柱状装薬でも類似の現象が見られた (Fig.5(a))。このデータと上に用いた $C_w = 2200$ m/sec を用いて爆速 D を計算すると 10, 20, 30 及び 40 cm の平均爆速はそれぞれ 2, 700, 4, 900, 5, 700 及び 3, 800 m/sec となり平均すると 4, 000 m/sec が得られた。柱状装薬の水中爆発における圧力波の幅(最初のピークと最後のピークの時間間隔)は装薬中の爆速と関係があるものと思われるが、行った実験の範囲ではその関係は定量的とまでいえない。より再現性のある関係が将来得られる可能性は残されている。

3.3 柱状装薬の水中爆発衝撃波圧力波形と伝爆性

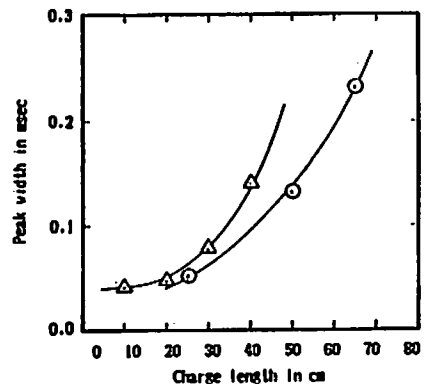


Fig. 5 Plot of Peak width vs. charge length in the underwater explosion.

○: Detonation cord
△: PETN in 3mm ϕ PVC tube

伝爆性及び限界薬径は使用性能及び取扱いの両面から重要な性質である。柱状装薬の水中爆発の衝撃波

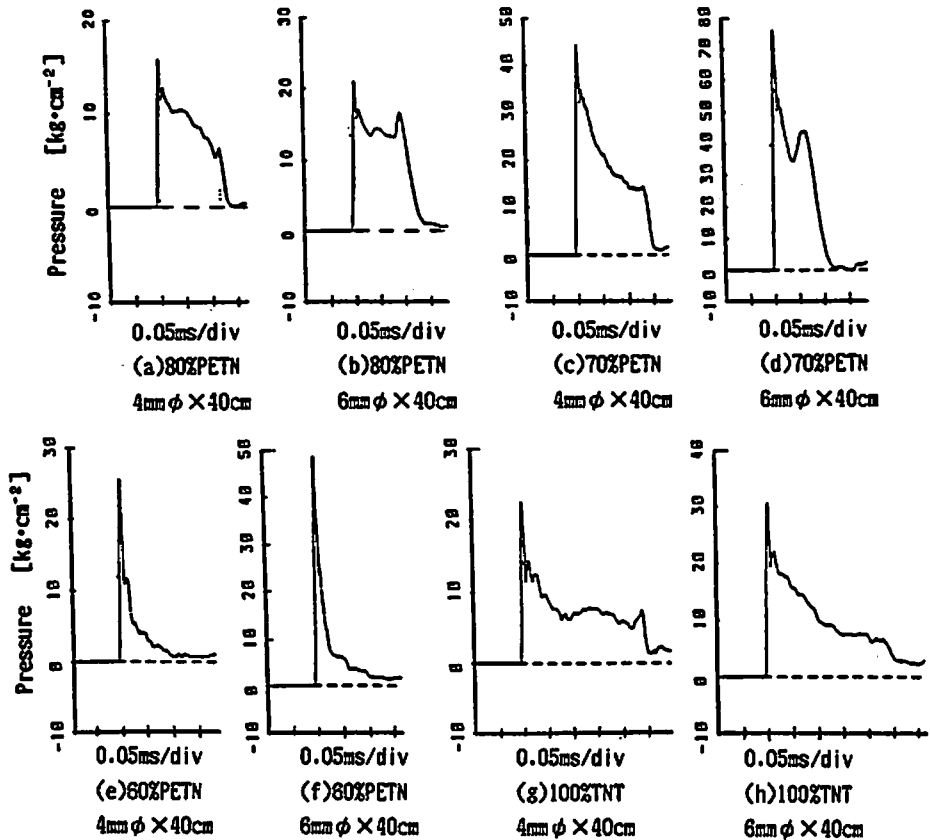


Fig. 6 Plot of pressure vs. time for the underwater explosion of wet PETN and dry TNT in PVC tubes of 40cm length.

波形から伝爆性の有無を推定することを試みた。Fig.6に4mmφまたは6mmφで長さ40cmの塩ビ管に詰めた水湿PETN粉及び乾燥TNT粉の水中爆発における衝撃波波形を示した。水分30%以下のPETN及び乾燥TNTはこの条件下ではどちらかの径の管内でも伝爆していることが伺える。しかし、波形は必ずしも一定の傾向を示さない。

これに対して60%PETNの場合は衝撃波ピークの幅が狭く、面積も小さいので不伝爆であることがわかる。長さ40cmの柱状装薬を用いて衝撃波ピークの幅及び衝撃波エネルギーの両者からかなりの精度で伝爆・不伝爆を判定することが出来る。

3.4 柱状装薬の水中爆発気泡エネルギーによる伝爆性の推定

水中爆発エネルギーの中で気泡エネルギーの測定は比較的容易で高精度である。ここでは水中爆発の気泡エネルギーを用いた可変試料量試験⁶⁾を試みた。試料長さを変化させた時の気泡エネルギー(E_b)の変化をFig.7に示した。100%PETNは2mmφでは30cmを過ぎたところで不伝爆となり、裂けない塩ビ管が5cm程度

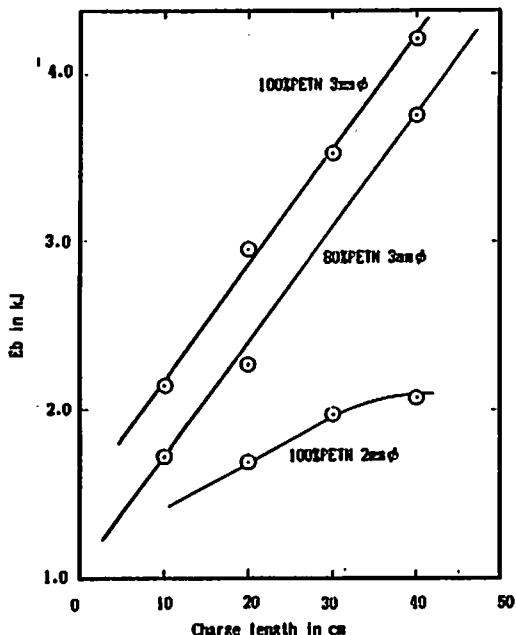


Fig. 7 Plot of E_b vs. charge length.

Table 3 Net E_f/W for the underwater explosion of cylindrical charge in PVC tube.

Explosive	diameter mm	E_f/W kJ/g	E/W_r % kJ/g
100% PETN	5	1.653	1.653
100% PETN	3	1.428	1.428
100% PETN	2	1.016	1.016
90% PETN	4	1.354	1.504
90% PETN	3	1.032	1.147
80% PETN	6	1.612	2.015
80% PETN	4	1.361	1.701
80% PETN	3	1.118	1.376
70% PETN	6	1.088	1.554
70% PETN	4	1.018	1.454
60% PETN	6	0.130	0.217
60% PETN	4	0	0
100% TNT	6	1.029	—
100% TNT	4	1.199	—

回収された。3 mmφでは100%及び80% PETNが伝爆性と判定された。

すなわち、100% PETN粉末の塩ビ管中での限界薬径はほぼ2 mmと推定される。又、水でこのPETNを80%に希釈しても限界薬径は3 mm以下であることが示された。

長さ40 cmの塩ビ管中の爆発の気泡エネルギーの爆薬1 g当りのエネルギーをTable 3に示した。3 mmφ～6 mmφの塩ビ管に詰めたPETNの1 g (100%換算)当りの爆発気泡エネルギーは1.15～2.02 kJ/gという値が得られ、これらは衝撃波波形からこの条件で伝爆性があることがわかる。

又、4 mmφ及び6 mmφで40 cm長さのTNT粉末は1 g当り1.20及び1.03 kJ/gの気泡エネルギーが得られたが、これも衝撃波波形から伝爆性があることがわかる。

60% PETNは4 mmφでも6 mmφでも殆ど反応していないことがわかる。PETNはこの実験の範囲では60%にまで水を希釈すればかなり安全となることがわかる。更にこれを確認するためには、大薬径の伝爆性試験が必要となる。

2 mmφの100% PETNは可変試料量試験及び未破壊残留物の存在から爆ごうが中断することがわかったが、衝撃波波形及び40 cmの長さの塩ビ管中での1回の実験では爆ごう中断を見出し得なかった。

文 献

- 1) R. H. Cole, "Underwater Explosion", Princeton University Press (1948)
- 2) 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及び伝爆性評価法の研究(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)
- 3) 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), 水中可変起爆剤試験による衝撃感度評価」, 工業火薬, 投稿中
- 4) 和田有司, 木村 歩, 吉田信生, 松永猛裕, 金子良昭, 中村聡敏, 吉田忠雄, 「水中爆発を用いた爆発性の評価(II) 30/40鉄管を用いた可変試料量試験による伝爆性評価」, 工業火薬, 投稿中
- 5) 吉田信生, 木村 歩, 和田有司, 松永猛裕, 金子良昭, 吉田忠雄, 「水中爆発を用いた爆発性の評価(III) 50/60鉄管と10 g PETN伝爆薬を用いた伝爆性試験」, 工業火薬, 投稿中
- 6) 吉田忠雄, 村永浩太郎, 松永猛裕, 萩井英彦, 村門 徹, 田村昌三, 「Mk II弾動臼砲の性能と応用(XI). 有機過酸化物の衝撃感度, 伝爆性と爆発威力の試験法」, 安全工学, 24, 256(1985)

The Detonating Propagation of the Cylindrical Charges by the Underwater Explosion.

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

The energy of shock waves and pulsating waves generated by the underwater explosion of samples can be measured simultaneously to evaluate the propagation of the detonation of unstable compounds.

The samples used in this experiment were powdered pentaerythritol tetranitrate (PETN) with and without water, powdered trinitrotoluene (TNT) and the detonating code. These powdered samples were put in a poly vinyl chloride (PVC) tube.

A sample of 70% PETN and 30% water, and the dried TNT showed a propagation of explosion for the cylindrical charges with a diameter of 4mm and 6mm according to the shock wave shape.

The 60% PETN having 40% water showed non-propagation of explosion because of the small area and the narrow width of the shock wave peak shape.

The propagation or non-propagation of explosions are shown by the width and energy of the shock waves produced by a cylindrical shaped charge which was 40mm in length.

The bubble energy of the explosives of 100% PETN showed that there was no propagation of explosion for diameters of PVC tube of less than 2mm. The bubble energy of the explosives of 80% PETN showed that there was no propagation of explosion for diameters of PVC tube of less than 3mm.

The bubble energies of 100% PETN in a cylindrical charge of 400mm in length and in diameters from 3mm to 6mm are shown to be from 1.15 to 2.02kJ/g, at which values, their propagation of explosion is inferred from the shock wave shape. The bubble energies of 100% TNT in a cylindrical charge of 400mm in length and in diameters of 4mm and 6mm are shown to be from 1.20 and 1.03kJ/g, at which values their propagation of explosion are inferred from the shock wave shape.

If the PETN was diluted by 40% water, the cylindrical charge with a diameter of 6mm did not react at all, which knowledge might be of use for transporting PETN with its water.

(*Technology Development Center, Hosoya Kako Co., Ltd. : 1847 Ohsawa, Sugao, Akigawashi, Tokyo 197, Japan

**Department of Reaction Chemistry, Faculty of Engineering, Tokyo University : Hongo Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

***Asa Laboratory, Explosive Division Nippon Kayaku Co., Ltd. : Sanyo-cho, Asa-gun, Yamaguchiken 757, Japan

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