

Table 1 Composition of tested propellants in wt%

Symbol	HTPB	Al	NH ⁴ ClO ⁴	HMX (A)	HMX (E)
A	11	18	71	0	0
B	11	18	61	0	10
C	11	18	51	0	20
D	11	18	61	10	0
E	11	18	51	20	0
F	11	18	41	30	0
G	12	18	62	0	0
H	14	18	68	0	0

HMX (A) : average diameter is about 200 μ

HMX (E) : average diameter is about 20 μ

Table 2 Results of the undersand explosion of No. 2 Enoki dynamite and composite propellants with 50g RDX booster in VP-50 PVC tube at d=60 cm

Sample	weight [g]	length [cm]	a [cm]	b [cm]	a [cm]	v [cm]
No. 2 Enoki	100*	-	-	-	-	-
	200*	-	167	170	12.5	93
	190	6	144	153	8	46
	390	13	181	182	28	241
	490	26	192	200	45	452
	590	31	203	209	51	566
	740	35	213	225	54	677
A + booster	327	10	150	151	13	77
	495	15	160	160	8.5	57
B + booster	364	10	210	210	50	577
	475	15	207	210	51	580
C + booster	359	10	200	205	47	504
	529	14	236	240	56	830
D + booster	356	10	191	191	49	468
	504	14	160	167	20	140
E + booster	337	10	204	206	49	539
	504	15	225	226	47	625
F + booster	336	10	200	200	47	489
	507	15	218	220	50	627
G + booster	330	10	165	167	30	234
	500	15	183	184	33	291
H + booster	321	10	160	160	17	114
	500	15	146	149	13	74

NG40%とこれに外割でNC3%を加えた高性能プラスチック爆薬で内径30mmの塩ビパイプ中での爆速が7800m/secのものである。寸法はRDXベレットとほぼ同じにして用いた。雷管は全て日本油脂(株)製6号電気雷管を用いた。

2.2 砂中爆発実験

砂中爆発実験は日本油脂(株)武豊工場の爆発試験室で行った。幅2.4m、奥行き4.3m、高さ1.5mの半円筒型ドームで、ドームは鉄板製である。一方は開放で他方には送風機が付いている。下は深さ約1mの

Table 3 Results of the underwater explosion of composite propellants (A-H) with No. 21 booster and No. 2 Enoki dynamite in 50 mm ID PVC tube

Sample	Weight [g]	Ch 1				Ch 3			
		T _b [ms]	E _b [MJ]	P _m [bar]	E _s [MJ]	T _b [ms]	E _b [MJ]	P _m [bar]	E _s [MJ]
No. 21	50	88	0.108	183	0.0565	88	0.108	38.4	0.0477
No. 21 +A	441	113	0.231	191	0.0810	113	0.230	39.6	0.0796
No. 21 +B	448	152	0.562	225	0.145	152	0.559	42.7	0.133
No. 21 +C	483	231	1.96	331	0.436	231	1.95	68.1	0.444
No. 21 +D	489	128	0.334	200	0.106	128	0.334	43.3	0.100
No. 21 +E	449	154	0.575	230	0.153	154	0.582	49.2	0.149
No. 21 +F	450	158	0.623	263	0.195	158	0.621	58.2	0.194
No. 21 +G	445	130	0.349	214	0.119	130	0.347	43.1	0.104
No. 21 +H	434	111	0.217	193	0.0816	111	0.217	41.2	0.0730
No. 2 Enoki	200	141	0.445	190	0.144	141	0.445	42.5	0.143

Table 4 Bubble energy of underwater explosion of composite propellant in 50/60 steel tube at 4 m depth

Sample	Weight [g]	T _b [ms]	E _b [MJ]	E _b [*] [MJ]
No. 21 + A	430	112	0.222	0.231
No. 21 + B	466	114	0.234	0.561
No. 21 + C	439	205	1.36	1.96
No. 21 + D	416	115	0.238	0.334
No. 21 + E	425	113	0.231	0.579
No. 21 + F	419	107	0.196	0.622
No. 21 + G	414	104	0.180	0.348
No. 21 + H	407	106	0.190	0.217
No. 2 Enoki	400	170	0.774	0.890

*: Value for explosion in PVC tube

砂層である。

VP-50 塩ビ管に RDX 伝爆薬と 6 号雷管を付けた推進薬をいれ、この試料の中心が 60cm の深さになるように砂中に水平に埋めて起爆した。生成した漏斗孔の容積 (V) を短径 (a)、長径 (b) 及び深さ (d) から下式によって求めた。

$$V = \pi abc / 12$$

推進薬の量を変化させて実験を行い (可変試料量試験)、爆発が量を増しても持続するかどうかを調べた。

2.3 水中爆発実験

水中爆発実験は日本油脂 (株) 武豊工場の爆発実験用の池で行った。池の直径は 36m、最深部は直径 10m で深さは 8m である。爆発は水深 4m のところで行わせた。試料容器として VP-50 塩ビ管を用いる場合には、衝撃波強度及び爆発気泡の膨張収縮振動の周期を爆点から 1m 及び 3.5m の所で測定した。圧

力波の検出にはトルマリンゲージを用いた。圧力波の記録は増幅器を経てデジタルメモリーで行った。データの解析はマイクロコンピター (NEC, PC-9801) を用いて行った。

50/60 鉄管を用いた実験では、破片によるトルマリンゲージの破損を恐れて水面上に設置したマイクロホンによって気泡の膨張収縮の周期のみを測定した。

3. 実験結果

3.1 砂中爆発実験

2号複ダイナマイト及びコンボジット推進薬の砂中爆発実験の結果を Table 2 に示した。更に、大薬量の試験が望ましかったが施設の規模からこれ以上の薬量の実験はできなかった。

3.2 水中爆発実験

VP-50 塩ビ管に 2号複ダイナマイト及びコンボジット推進薬 (A-H) を詰め、これを 6号電気雷管また

は 50 g No.21 ブースターで起爆した結果を Table 3 に示した。なお、Table 3 中の記号 P_m は衝撃波のピーク圧、Ch1 は爆源から 1 m の位置のデータ、Ch3 は 3.5 m の位置のデータである。この表から、水中爆発における気泡周期の計測の精度が非常によいことがわかる。

気泡エネルギー (E_b) 及び衝撃波エネルギー (E_s) は下式^{11) 12)} により計算した。

$$E_b = KP_b^{3/2} T_b^2 \rho_w^{-1/2}$$

ここに、 T_b は爆発気泡の膨張収縮運動の周期、 P_b は静水圧、 ρ_w は水の密度、 k は定数である。

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

ここに、 R は爆源からセンサーまでの距離、 C_w は水の音速、 θ は衝撃波の減衰定数、 P は衝撃波圧力である。

また、内径 50 mm、外径 60 mm、長さ 500 mm、で、底を溶接し、ねじ蓋を付けた引き抜き鋼管にコンポジット推進薬を詰め、空間には砂を詰めて、No.21 ブースター 50 g で起爆した時の気泡エネルギー測定結果を Table 4 に示した。

4. 考察

4.1 砂中爆発実験結果の考察

VP-50 塩ビ管に充填した爆発物が 60 cm の砂中で爆発したときに生成する漏斗孔の容積を知るために、2 号榎ダイナマイトを用いて砂中爆発実験を行った。爆薬薬量 (W) に対する漏斗孔容積 (V) のプロットを Fig. 1 に示した。100~740 g の薬量の範囲で実験誤差の範囲内で V と W は直線関係を示した。ただし、100 g のダイナマイトでは漏斗孔は生成しなかった。

これに対し、A~H のコンポジットロケット推進薬の砂中爆発実験の結果は Fig. 2 のようになった。この図から HMX 含有していない A 及び H は試料の中の僅かな部分しか爆発していないことがわかる。G (HMX (E) 8%) も A 及び H に比べれば爆発量は増しているが伝爆していないことが明かである。D (HMX (A) 10%) は短い試料はほぼ全体が爆発しているとみられるが、長い試料では僅かな部分しか爆発していない。爆発が伝爆しない場合には僅かな条件の違いでこの様な現象が起こるものと思われる。C (HMX (E) 20%) は伝爆している可能性が高い。もし、C が伝爆しているとする短い薬包の実験では B (HMX (E) 10%)、C、D、E (HMX (A) 20%) 及び F (HMX (A) 30%) は全て完爆していると推定される。ただし、長い薬径の実験では D は不完爆であり、B、E、及び F は実験精度の範囲内で伝爆したかしないかを判断しにくい。残念ながらこれ以上の薬量の実験は

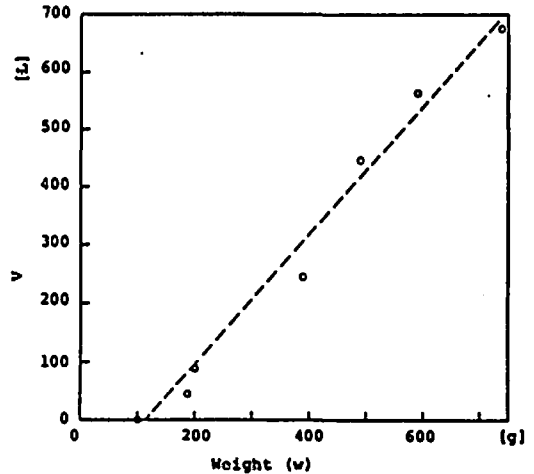


Fig. 1 Plot of crater volume (V) vs. weight (W) of No.2 Enoki dynamite in the understand explosion.

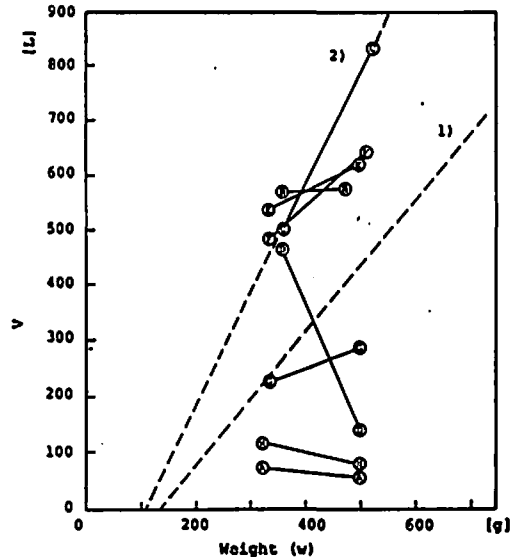


Fig. 2 Plot of crater volume vs. weight (W) of composite propellants line 1) is for No.2 Enoki dynamite and line 2) is for propellant C.

この施設では不可能なので行わなかった。

砂中爆発における漏斗孔生成能力はコンポジット推進薬の方が 2 号榎木ダイナマイトより大きい。Fig. 2 で用いた W はコンポジット推進薬重量と RDX ベレット 50 g の和であるが、RDX の割合は比較的小さいのではコンポジット推進薬の性質とみてよいであろう。仮に、1) 及び 2) の直線の勾配を比較すれば 1 : 1.6 であった。

砂中爆発実験における漏斗孔生成力は爆発量に比例すると仮定すると、伝爆した試料 C のデータと他の

Table 5 Summary of experimental results of underwater explosion of propellants in 50 mm ID PVC tube

Sample	Weight [g]	\bar{E}_b [MJ]	\bar{E}_s [MJ]	$\Delta\bar{E}_b$ [MJ]	$\Delta\bar{E}_s$ [MJ]	$\Delta\bar{E}_b + \Delta\bar{E}_s$ [MJ]	$\Delta\bar{E}_s / (\Delta\bar{E}_b + \Delta\bar{E}_s)$ [MJ]	% expl.	length of induced expl. [mm]	$(\Delta\bar{E}_b + \Delta\bar{E}_s) / \text{kg}$ [MJ/kg]
No. 21	50	0.108	0.0521	0.108	0.0521	0.160	0.325	100	—*	3.2 (1.08)
No. 21 + A	441	0.231	0.0803	0.123	0.0282	0.151	0.187	7.3	< 10	
No. 21 + B	448	0.562	0.139	0.453	0.0869	0.540	0.161	26	8~10	
No. 21 + C	483	1.96	0.440	1.852	0.3879	2.24	0.173	100	—*	4.64 (1.57)
No. 21 + D	489	0.334	0.103	0.226	0.0482	0.274	0.176	12.3	< 10	
No. 21 + E	449	0.575	0.151	0.471	0.0989	0.570	0.174	27	9.4~10	
No. 21 + F	450	0.623	0.195	0.514	0.1429	0.657	0.218	31	14.7	
No. 21 + G	445	0.349	0.112	0.240	0.0599	0.300	0.200	14.4	< 10	
No. 21 + H	434	0.217	0.0773	0.109	0.0251	0.134	0.187	6.7	< 10	
No. 2 Enoki	200	0.445	0.144	0.445	0.144	0.589	0.244	100	—*	2.95 (1.0)

*: Detonation propagated. expl.: explosion

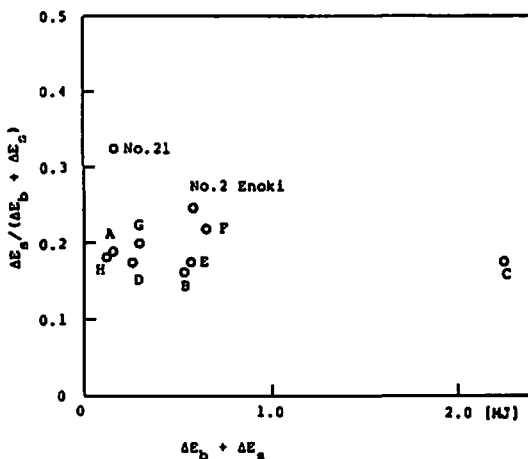


Fig. 3 Plot of ratio of shock energy ($\Delta E_s / (\Delta E_b + \Delta E_s)$) vs. sum of two energies ($\Delta E_b + \Delta E_s$)

各推進薬のデータを比較することによって各試料の爆発率及び爆発した距離を推定できる。推定結果を Table 5 に示した。

4.2 水中爆発実験結果の考察

Table 3 に示した測定値を整理した結果を Table 5 に示した。 ΔE_b 及び ΔE_s はそれぞれ爆薬または推進薬のみの気泡エネルギー及び衝撃波エネルギーの平均値である。この値に上記 2 種の平均エネルギーの和 ($\Delta E_b + \Delta E_s$) 及びそれに対する衝撃波エネルギーの割合を示した。また、伝爆したかしないかの判定材料として 1 kg 当りの平均エネルギーの和 ($\Delta E_b + \Delta E_s$) / W も示した。

この結果から試験を行った径 50mm, 約 450g のコンポジット推進薬は微粒 HMX 20% を含む C 試料のみが伝爆し、他は最高 31% の爆発 (試料 F: 粗粒 HMX 30% 含有) を示したにとどまった。

次にコンポジット推進薬 (A-H) の爆発の性質を調べるためにエネルギーの和 ($\Delta E_b + \Delta E_s$) に対して衝撃波エネルギーの割合 $\Delta E_s / (\Delta E_b + \Delta E_s)$ をプロットしたのが Fig. 3 である。高性能爆薬 No. 21 はこの割合が 0.325 と高く、それに続いて 2 号複ダイナマイトが 0.244 と高い。これに対してコンポジット推進薬 (A-H) に対する値は 0.161~0.218 でやや低い。伝爆したと思われる試料 C についても 0.173 で特に異なった値を示さなかった。

従って、推進薬 C が完爆したことを前提として、不完爆の推進薬の爆発率を用いてその推進薬がどの長さまで爆発したかを推定することが可能である。水中爆発実験に用いた推進薬の断面図は Fig. 4 のようである。伝爆薬の側面部の推進薬の容積の全体の推進薬

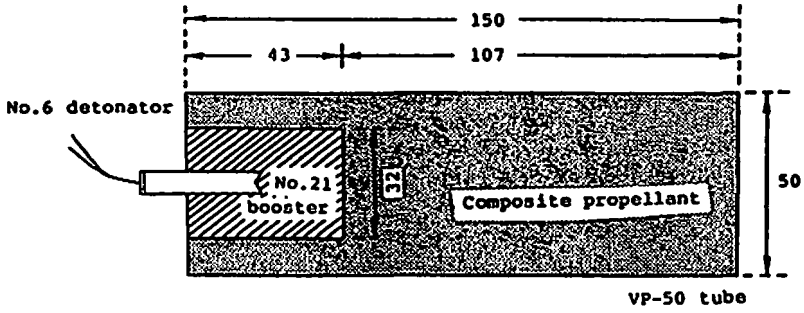


Fig. 4 Cross section of propellant cartridge used in underwater explosion (unit in mm)

に対する割合は約20%である。この結果から試料A, D, G及びHでは伝爆薬の側面部も完爆していないことになる。それ以外の試料については伝爆薬からその長さまで誘発的な爆発が起こったかを推定することができる。

爆発物は薬質が類似の場合は、薬径が大きいほど、密閉度が大きいほど、起爆エネルギーが大きいほど伝爆しやすいと考えられている。BAM50/60鉄管試験はこの様な条件を満たした伝爆性の試験法と考えられている。塩ビ管を使った試験に比べて50/60鉄管試験は密閉度が大きい。

しかし、鉄管を用いた水中爆発の経験がなく、測定装置を破損する恐れがあったのでトルマリンゲージによる測定は行わず、マイクロホンを用いて気泡振動の周期のみを測定した¹³⁾。

Fig. 5に50/60鉄管中の爆発の気泡エネルギー(E_b)の塩ビ管中のそれ(E_b^*)に対するプロットを示した。コンボジット推進薬の中では試料Cのみが伝爆している。試料Cの半径重量あたりの爆発気泡エネルギーは2号徑ダイナマイトの1.60倍であった。

塩ビ管中の爆発と鉄管中の爆発の1つの違いは後者の方が測定される気泡エネルギーが小さいことである。これはダイナマイトについても完爆した試料Cについてもいえる。1つの理由は爆発エネルギーの一部が鉄管の破壊に使われるためと考えられる。もう一つの理由は鉄管試験では砂を詰めて用いているので、砂に爆発のエネルギーの一部が吸収されたことも考えられる。

塩ビ管を用いた実験と異なり、鉄管を用いた実験では伝爆しなかった推進薬の爆発の気泡エネルギーはほぼ一定(0.180~0.238MJ)となり、HMX含量による傾向を示さなかった。これに対する1つの考え方は不伝爆の場合の爆発エネルギーの増分は砂の中に吸収されたというものである。しかし、この点についての正しい解釈は今後の実験を待たなければならない。

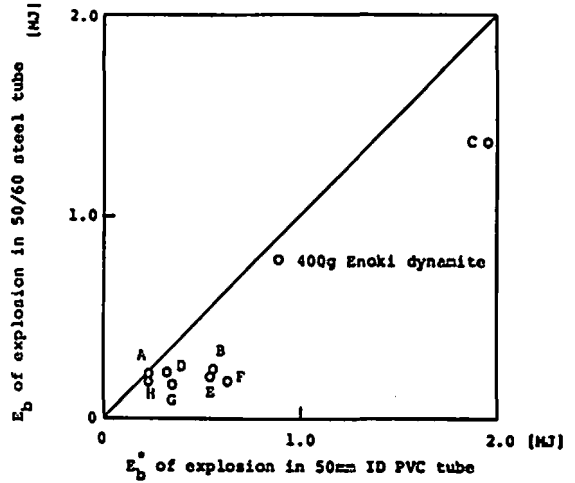


Fig. 5 Plot of E_b vs. E_b^*

4.3 弾動臼砲、弾道振子、砂中爆発及び水中爆発 (塩ビ管中及び鉄管中) 各方法の比較

弾動臼砲を用いた可変起爆剤試験では用いた推進薬(A-H)約15gはPETN当量0.5gで完爆している⁷⁾。この試験では試料は起爆剤から最長の所で20mmあるので、この起爆剤から20mmのところまで爆発していることになる。次に行った弾道振子を用いた可変試料量試験では伝爆したものはなく、爆発距離は26~39mmであった。伝爆薬量はPETN粉末20gで、推進薬直径は20mmであった。

径50mmの推進薬を用いた砂中爆発及び水中爆発実験では推進薬Cは爆ごうを伝播している。したがって、径20mmの試験では大直径の場合に伝爆性のないことを証明できない。

砂中爆発実験ではFig. 2から推定されるように誘爆距離がかなり長い。B, E, F等は50mm以上と推定される。水中爆発実験では塩ビ管法では誘爆距離は完爆しなかつたものについて15mm以下であった。また、鉄管法では誘爆距離はほぼ一定で見かけ上0に近い。

これらの差異についての実験的な検討はまだ行われていないが、いくつかの仮説を示すことができる。

非伝爆性の固形物質に強い起爆エネルギーが与えられたときは固形物の粉碎が起こる。粉末は固形物より着火し易いので粉碎された物質が発火することは起こり得る。この粉末が爆発すると衝撃波エネルギーと膨張エネルギーを外部に放出する。

水中爆発や臼砲内の起爆では粉碎された物質が爆発して観測されるエネルギーとなる割合が少なく、砂中爆発では粉碎された物質が外部に放出される前に爆発してより多くの砂を吹き飛ばすものと思われる。

弾道振子の臼砲中では粉碎物質の爆発が完了する前に臼砲外に放出され、水中爆発では水圧のために粉碎が充分に行われぬものと思われる。

5. まとめ

砂中爆発法及び水中爆発法を用いて HMX 入りコンポジット推進薬の爆ごう伝播性を検討した。検討した範囲内で微粒 HMX20% 入りの推進薬だけが伝爆することが示された。粗粒 HMX30% 入りの推進薬は伝爆しなかった。

水中爆発法は伝爆性の試験法としては優れた精度を持っており、この試験法によれば推進薬の誘爆距離は HMX の含量を増すことにより延びることが認められた。

伝爆をしない物質でも起爆をする条件によってはかなり長い見かけの誘爆距離を示すことがあることがわかった。

謝 辞

本研究を進めるに当たり文部省宇宙科学研究所から特別事業費による研究助成をいただいた。付記して感謝する。また、実験を進める上でお世話になった、日本油脂(株)化薬研究所の福田孝明、酒井洋、鈴木直久、山本昭飛己、加藤一成各氏に謝意を表す。特に不伝爆物質の特異な挙動に関する仮説については酒井氏との議論に負うところが大きい。

文 献

- 1) N. Kubota, M. Takizuka and T. Fukuda, "Combustion of nitramine composite propellants", AIAA Paper No.81-1582 (1981)
- 2) N. Kubota, "Combustion mechanism of nitramine composite propellants", Proceedings of the 18th Symp. (Inter.) on Combustion, The Combustion Institute (1981)
- 3) D. F. Pennington, T. Man and B. Persons; "Rocket Propulsion Hazard Summary: Safety Classification, Handling Experience and Application to Space Shuttle

Payload", NASA CR-145185 (1977)

- 4) a) 鈴木 直久, 山本 昭飛己, 加藤 一成, 「HMX含有コンポジット推進薬の安全性評価試験抄録」, 日本油脂化研 SR-G 発第353号 (1985)
b) 加藤 一成, 清水 治昭, 福田 孝明, 米田 国明, 浅羽 哲朗, 「ニトラミンコンポジット推進薬の感度について」, 工業火薬, 41, 375 (1982)
c) K. Kato, H. Shimizu, T. Fukuda, K. Yoneda and T. Asaba, "Detonability of Propellant Containing Nitramine", Proceedings of the 13th International Symposium on Space Technology and Science, 1982
- 5) 通商産業省立地公害局保安課・工業技術院化学技術研究所, 「昭和60年度岩手山(岩手県)火薬類の保安技術実験報告書」, (1985)
- 6) 村永 浩太郎, 松永 猛裕, 田村 昌三, 安部 隆幸, 吉田 忠雄, 「MKⅢ弾動臼砲を用いた爆発性物質の衝撃感度測定法」, 工業火薬, 41, 375 (1985)
- 7) 松永 猛裕, 池田 義之, 平井 靖男, 萩井 英彦, 吉田 忠雄, 「弾道振子による有機過酸化物の伝爆性及び静的爆発威力試験法の研究」, 安全工学, 24, 247 (1985)
- 8) 松永 猛裕, 田村 昌三, 岩間 彬, 吉田 忠雄, 「HMX入りコンポジット推進薬の衝撃感度及び伝爆性(1)-弾動臼砲及び弾道振子による評価-」, 工業火薬, 4895 (1987)
- 9) 松永 猛裕, 村永 浩太郎, 黒田 英司, 伊藤 葵, 田村 昌三, 安部 隆幸, 青藤 照光, 吉田 忠雄, 「砂中爆発法の性質と応用(1)-漏斗孔容積と伝爆性-」, 工業火薬, 47, 309 (1986)
- 10) C.M. Mason and E.G. Aiken, "Methods for Evaluating Explosives and Hazardous Materials", US Bureau of Mines IC 8541 (1972)
- 11) B. D. Khristoforov, "Parameters of Shock Waves and Gaseous Bubbles Arising from Underwater Explosives of Small PETN Charges", ARS J. Suppl., November 1962, pp.1788-1790
- 12) C. M. Mason, J.L. Uraco and J.C. Cooper, "Development and Evaluation of Nonincendive Detonating Cord", BuMines Rept. of Inv.7149, Juen 1968
- 13) 田中 一三, 生沼 仙三, 「水中爆発ガス球脈動周期のマイクロフォンによる測定」, 工業火薬,

**Methods for Evaluation of Shock Sensitivity and Detonation Propagation
of Composite Propellants Containing HMX (II)**

—Evaluation by Undersand and Underwater Explosion Tests—

by Takehiro MATSUNAGA*, Masamitsu TAMURA*, Akira IWAMA**
Terumitsu SAITO*** and Tadao YOSHIDA*

Undersand and Underwater explosion test methods were applied to evaluate ability to propagate detonation of composite propellants containing HMX. The variable sample test for detonation propagation of the propellants using the undersand explosion could distinguish propagation and non-propagation for some propellants but not for others because of limitation of sample weight which could be used in our facility.

The underwater explosion experiments clearly showed that only propellant C containing 20% of fine particle sized HMX propagated detonation. Other propellants did not propagate detonation and it was shown that the induced detonation distance was increased with increasing the concentration of HMX.

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

** The Institute of Space and Astronautical Science, 4-6-1 Komaba,
Meguroku Tokyo 153

*** Corporate Juridical Person Japan Explosive Safety Association,
1-12-4 Kudankita, Chiyodaku, Tokyo 102)