

HMX入りコンポジット推進薬の衝撃感度及び伝爆性評価法の研究 (第1報)

—弾動臼砲及び弾道振子による評価—

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を弾動臼砲及び弾道振子によって試験した。

衝撃感度を調べる Mk III 弾動臼砲による可変起爆剤試験は推進薬の爆発の威力が強く、装置の強度上行うことが困難であることがわかった。そこで、従来型の弾動臼砲で試験したところ、0~30%までHMX量を変えた各組成の推進薬でその衝撃感度はあまり変わらず、推進薬15gは0.28~0.48gのPETN当量の衝撃で爆発的な反応(爆ごうではない)をした。

伝爆性は弾道振子を用いた可変試料量試験によって調べた。その結果、これらのコンポジット推進薬は自己持続的な爆ごうを起こさないことがわかった。

1. はじめに

ニトラミン含有コンポジット推進薬は、酸化剤の過塩素酸アンモニウム (APと略記) の一部をHMX, RDX等のニトラミン系高性能爆薬で置換したものである。この推進薬は(1)高比推力が得られる、(2)火災温度が低い、(3)低燃焼速度が達成できる等の特徴を持ち¹⁾²⁾、将来の宇宙ロケット用上段モーターに適用することが検討されている。しかしながら、従

来のコンポジット推進薬に比べて爆ごう性を持つニトラミンを含有しているコンポジット推進薬は爆ごう伝播性を持つようになる可能性がある。

爆ごう伝播性のある爆発物は国際的な輸送規則ではクラス1.1に分類され、その輸送は厳しい規制を受ける³⁾。ロケット推進薬もその例外ではない。また、取り扱いの安全の立場からもロケット推進薬の危険性評価試験が行われ、それに基づいた危険性分類が行わ

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	8
H	14	18	68	0	0

HMX (A): average diameter is about 200 μm.

HMX (E): average diameter is about 20 μm.

昭和61年10月17日原稿受理

*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 (内7293)

**宇宙科学研究所
〒153 東京都目黒区駒場 4-6-1
TEL 03-467-1111

れている⁴⁾。

鈴木、加藤、福田らは先にニトラミン含有コンポジット推進薬の危険性評価のために落槌感度試験、摩擦感度試験、カードギャップ試験⁵⁾等を行ってきた。筆者らは更に弾動臼砲及び弾道振子を用いた衝撃感度及び伝爆性の試験を行ったのでその結果を報告する。

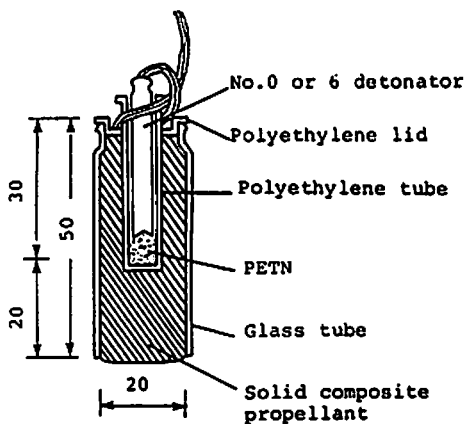


Fig. 1 Test sample assembly for the ballistic mortar tests (unit : mm)

Table 2 Test results with the Mk III ballistic mortar

sample	detonator	length of swing (mm)	net length of swing (mm)	observation
A	No. 0	29	20	burned
A	No. 6	>500		complete explosion
B	No. 0	5	0	burned
C	No. 0	13	4	burned
D	No. 0	4	0	burned
E	No. 0	9	0	burned
F	No. 0	0	0	burned
G	No. 0	0	0	burned
G	No. 6	223	214	partial explosion, burned
H	No. 0	33	24	burned

ポリエチレン内筒に入った0号雷管では試験した全ての推進薬は殆ど爆発的な分解を起こさなかった。このことはTNT粉末より起爆に対して鈍感なことを示している⁶⁾。また、大部分の試料が0号雷管による起爆で燃えているので、この条件下では爆発はしないが燃え出す可能性を示している。しかしながら、開放条件下での起爆で着火するか否かはそのための実験を行わないと分からない。試料Aを6号雷管で起爆すると500mm以上の臼砲振れ幅を示した。これは測定精度、装置の耐久性及び実験者の安全性などの点でMk III弾動臼砲の測定範囲を超えるのでより測定範囲の広い従来型弾動臼砲を用いて実験を行うことにした。

4. 従来型弾動臼砲を用いた実験

Mk III弾動臼砲の結果、その能力以上の爆発力が観

2. 実験に用いた試料

実験に用いたコンポジット推進薬の組成をTable 1に示す。この組成の推進薬を弾動臼砲試験用にはFig. 1のように、弾道振り試験では24mmφ×50mmの円筒型に成形したものを用了。

3. Mk III弾動臼砲による可変起爆剤試験⁶⁾

3.1 実験方法

0号および6号雷管(日本油脂(株)製)のみを用いてPETN伝爆薬は用いずに予備的な実験を行った。Fig. 1に示すような試料アセンブリを注型・固化によって作成し、電気雷管を差し込み、Mk III弾動臼砲⁶⁾の孔にいれ、2kgの投射物を孔の入口に取り付けて雷管を起爆した。

3.2 実験結果と考察

Mk III弾動臼砲を用いた実験結果をTable 2に示す。

この試験結果からは2つの点に言及できよう。即ち、

測されたため、従来型弾動臼砲試験を行うことにした。用いた従来型弾動臼砲は日本油脂(株)武豊工場に設置されているもの(JIS 4810—1979)である。また、試料はMk III弾動臼砲のときに用いたものと同様の組成で、試料アセンブリもFig. 1と同様のものである。

4.1 実験方法

(1) 雷管及びブースターの爆発力試験

6号雷管及び6号雷管+PETN 0.6gをそれぞれポリエチレン内筒にいれ、臼砲内に挿入し、弾丸を取り付け発破器で起爆し、その振れ角を測定した。0号雷管による実験は臼砲が殆ど振れず、誤差が大きくなるため行わなかった。

(2) 推進薬の衝撃感度試験

各試料につき、可変起爆剤試験⁶⁾における起爆エ

エネルギー最小, 中, 最大に相当する 0 号雷管, 6 号雷管及び 6 号雷管+PETN0.6g をそれぞれポリエチレン内筒に入れ, 試料のはいった試料アセンブリに差込み, 弾動臼砲試験を行った。そして, その振れ角の変化を見て中間の起爆エネルギー, 例えば 0 号雷管+PETN0.2g 等による試験を行い, 振れ角の変化を更に詳しく調べた。

4.2 実験結果と考察

従来型弾動臼砲を用いた実験結果を Table 3 に示す。

4.2.1 爆発量と従来型弾動臼砲の振れ幅との関係について

従来型弾動臼砲については爆発威力: ウェイトストレンクス (WS) は次のように定義されている⁸⁾。

$$WS = 100 (1 - \cos\theta) / (1 - \cos\theta_0) \quad (1)$$

$$100 \times d^2 / d_0^2$$

Table 3 Results of the variable initiator test for composite propellants using the conventional ballistic mortar

Sample	detonator No.	PETN [g]	PETN eq. [g]	swing angle [°]	net swing angle [°]	
A*	0	0	0.18	0	0	
	0	0.2	0.38	0.33	0.28	
	0	0.3	0.48	19.17	17.74	
	6	0	0.60	20.30	18.05	
B*	6	0.6	1.20	19.25	14.75	
	**	0	0.18	0	0	
	0	0.1	0.28	14.25	13.20	
	0	0.2	0.38	17.25	15.69	
	0	0.3	0.48	19.00	17.20	
	6	0	0.60	20.88	18.63	
	6	0.6	1.20	17.83	13.33	
	C***	0	0	0.18	0.83	0.15
*	0	0.1	0.28	0	0	
	0	0.2	0.38	15.00	13.58	
	0	0.3	0.48	15.83	14.03	
	6	0	0.60	17.82	15.57	
D*	6	0.6	1.20	16.47	11.97	
	*	0	0.18	0	0	
	0	0.1	0.28	0.58	0	
	0	0.2	0.38	14.50	13.07	
	0	0.3	0.48	20.08	18.26	
	6	0	0.60	21.67	19.42	
	6	0.6	1.20	18.00	13.50	
	E*	0	0	0.18	0	0
	0	0.1	0.28	11.42	10.37	
	0	0.2	0.38	13.67	12.24	
	0	0.3	0.48	18.50	16.70	
	6	0	0.60	19.83	17.58	
G	6	0.6	1.20	19.27	14.77	
	***	0	0.18	1.13	0.45	
	0	0.1	0.28	0.92	0	
	0	0.2	0.38	8.07	6.64	
	6	0	0.60	18.75	16.50	
	6	0.6	1.20	18.30	13.80	
	H*	0	0	0.18	0	0
	*	0	0.1	0.28	0	0
	0	0.2	0.38	13.47	12.04	
	0	0.3	0.48	13.58	11.78	
	6	0	0.60	20.08	17.83	
	6	0.6	1.20	22.92	18.42	

* : Unreacted material remained and the projectile was not ejected.

** : Scattered material burned.

*** : Sample in the bore burned.

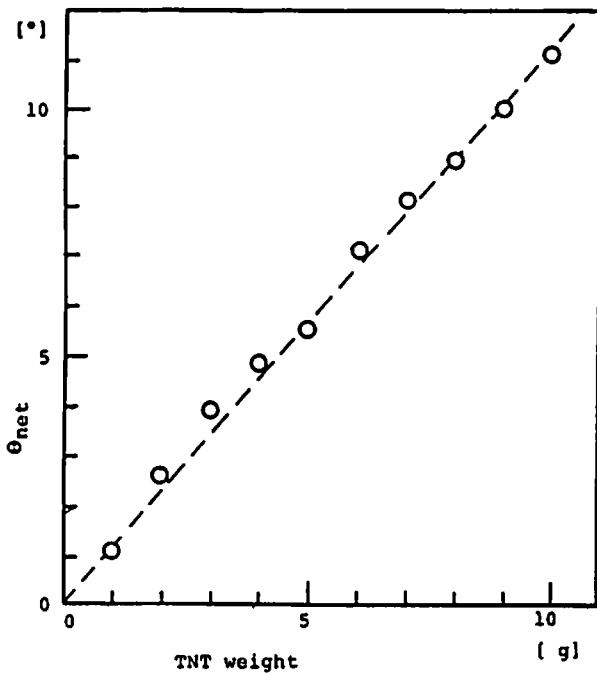


Fig. 2 Plot of θ_{net} vs. TNT weight in the conventional ballistic mortar test

ここで、 θ は試料の臼砲の振れ角、 θ_0 は標準爆薬の臼砲の振れ角、そして d は試料の臼砲の振れ幅、 d_0 は標準爆薬の臼砲の振れ幅である。一方、Mk III弾動臼砲を用いた爆発威力 (B')は次の式で良好な値を与えることが示されている⁹⁾。

$$B' = 100 (d - d_0) / (d_1 - d_0) \quad (2)$$

ここに、 d 、 d_0 及び d_1 はそれぞれ試料、起爆剤及び標準爆薬の振れ幅である。

筆者らの実験によると従来型弾動臼砲では爆発威力は(1)式と(2)式の間関係があることがわかっている⁹⁾。ここでは、爆発威力の解析を目的としないので、近似的に(3)式によって正味振れ幅 (θ_{net})を求め、これを爆発威力の尺度とした。

$$\theta_{net} = \theta - \theta_0 \quad (3)$$

ここに、 θ ：試料とブースター（雷管+PETN）による実測振れ角

θ_0 ：ブースター（雷管+PETN）による振れ角。(4)式から計算する。

θ_{net} ：正味振れ角

θ_{net} が近似式として成立することはFig. 2

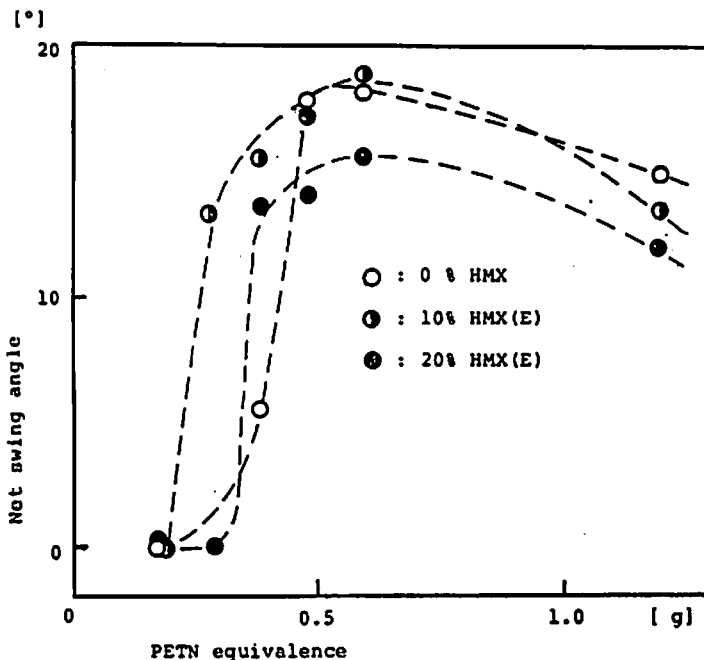


Fig. 3 Plots of net swing angle vs. PETN equivalence. Effect of HMX (E content)

に見ることができる。

4.2.2 雷管及びブースターによる臼砲振れ角

6号雷管及び6号雷管+PETN 0.6gによる臼砲振れ

角はそれぞれ 2.25° 、 4.50° であった。これより、雷管及びブースターのPETN当量 (W_{PETN})と臼砲振れ角 θ_0 との関係は(4)式で表される。

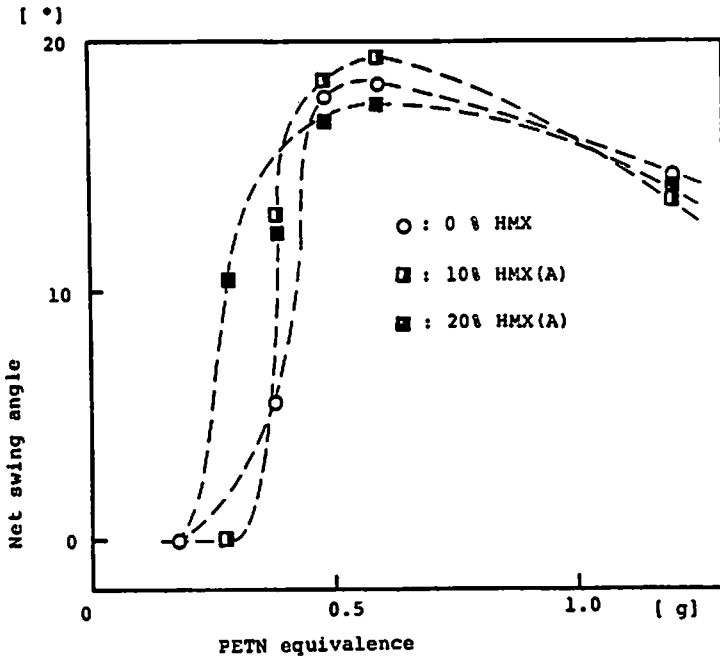


Fig. 4 Plots of net swing angle vs. PETN equivalence. Effect of HMX(A) content

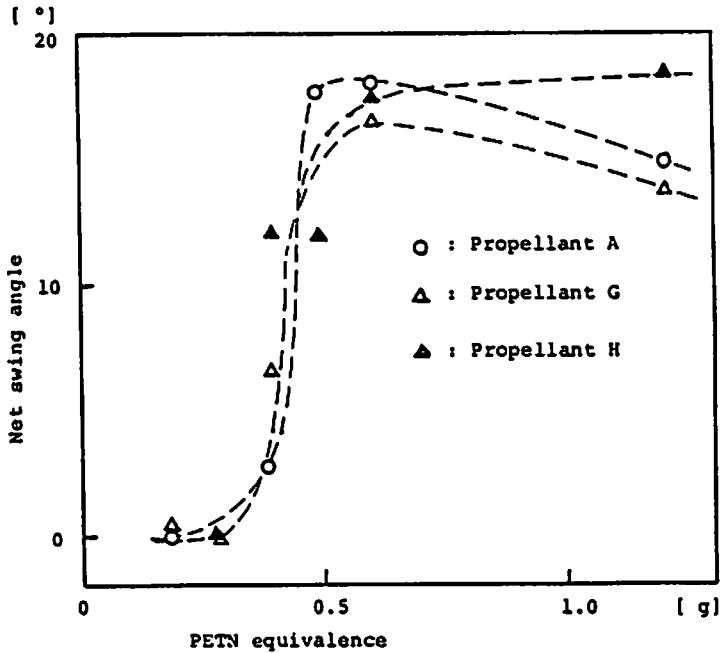


Fig. 5 Plots of net swing angle vs. PETN equivalence. Comparison of propellants A, G and H

$$\theta_0 = 3.75 W_{PETN}$$

(4)

4.2.3 可変起爆剤試験によるA~Hの推進薬の感度

Fig. 3にHMX(E)含有及び非含有推進薬の弾動臼砲試験におけるPENT当量に対する正味振れ角のプロットを示した。この図でみる限りではHMX10%含有

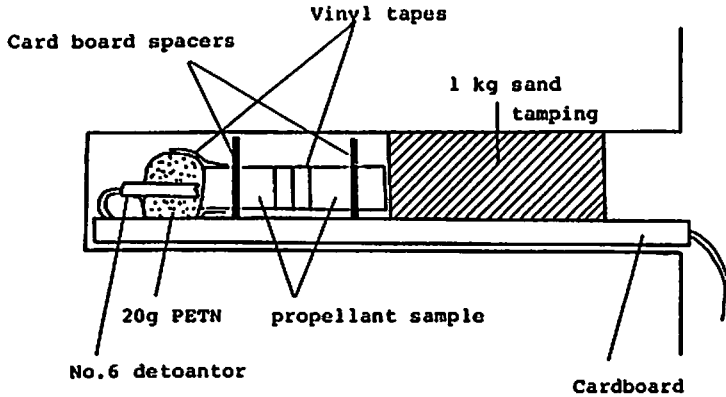


Fig. 6 Test sample assembly for the variable sample twist in the ballistic pendulum

推進薬がもっとも感度が高く、20%含有品、非含有品の順に感度が低くなっていることになる。しかし、2つの問題点がある。1つはここに現れた正味振れ角は起爆剤の爆発によって誘発された推進薬の爆発的な分解によるものであり、自己持続的な爆発によるものではない。これは弾道振り実験によって証明されている。従って、ここに示された見かけの感度の差は実質的な意味を持たない可能性がある。

他の1つは可変起爆剤試験結果におけるこの程度の差異が有意なものかどうかという点である。試料の調

整法のバラツキがこの程度の差異をもたらすかもしれない。もし、Fig. 3 に示された実験結果が有意なものとなれば、これは衝撃による起爆感度ではなく、衝撃による着火性の差を表していると思われる。

Fig. 4 にはHMX(A)の添加量を変えた実験結果を示した。HMX(E:細粒)を添加した場合を比べると10%添加した場合と20%添加した場合の結果が逆転している。以上2組の実験結果は10~20%のHMXの添加は着火感度を僅かに高める効果があるかもしれないが、その程度は非常に小さいことを示している。

Fig. 5 には推進薬A、G及びHの比較をした結果を示す。これらの推進薬のこの試験法による感度は殆ど差異のないことが示された。

1つの例外を除いてPETN当量0.6gの場合より1.2gのほうが正味振れ幅が小さくなっている。この現象はMkIII弾動臼砲を用いた多くの実験でも観測されている。この正確な理由は現在までのところ明らかではないが、1つの仮説は試料の全体を爆発または分解・気化させるに十分な起爆剤の量以上の起爆薬を与えると全体の爆発エネルギー中の衝撃波エネルギーの割合が増し、これが臼砲の中に投射され、ガス膨張のエネルギーが減るためであろうとするものである。この仮説の証明のためには別の実験を行わなければならない。

5. 弾道振りによる可変試料量試験

ここで用いた推進薬は爆発的な分解が起こったときにはその力が強く、

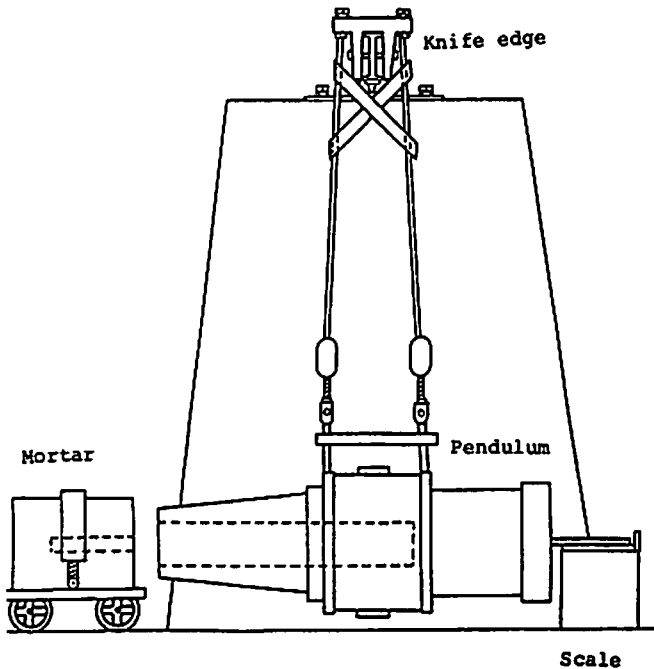


Fig. 7 Outline of the ballistic pendulum Bore of the mortar: Depth 480mm Caliber 50mm

Table 4 Results of the variable sample weight test for the explosion propagation of composite propellants using the ballistic pendulum (Observed swing length in mm*)

Sample	Sample length [mm]			
	25 mm	50 mm	50 mm**	100 mm
A	40.4	42.4	38.7	41.6
		47.0		
B	38.3	42.1	41.5	41.8
C	40.1	44.7	42.8	47.6
		56.2		
D	40.0	46.1	43.9	45.0
E	40.2	51.0	42.9	45.7
		39.3		
F	38.5	45.2	41.0	52.4
G	39.3	42.8	39.8	46.0
H	40.0	38.0	40.8	41.1
		43.8		

* : Observed swing lengths for 20 g PETN and a no. 6 detonator were 21.0, 20.7 and 23.8 mm. The average is 21.8 mm.

** : The booster cartridges were not fixed to samples by vinyl chloride tapes.

Table 5 Net swing length of the ballistic pendulum and length of the induced explosion of propellant samples.

Sample	Net swing length [mm]			Length of induced explosion [mm]		
	Sample length [mm]					
	25	50	100	50	100	average
A	18.6	20.6	19.8	27.7	26.6	29
		25.2		33.9		
B	16.5	20.2	20.0	30.6	30.3	31
C	18.3	22.9	25.8	31.3	35.2	38
		34.2		46.7		
D	18.2	24.3	23.2	33.4	31.9	33
E	18.4	29.2	23.9	39.7	32.8	32
		17.5		23.8		
F	16.7	23.4	30.6	32.5	45.8	39
G	17.5	21.0	24.2	30.0	34.6	32
H	18.2	16.2	19.3	22.3	26.5	26
		22.0		30.2		

Mk III 弾動臼砲では可変試料量試験⁶⁾ができない。そのために弾道振子を用いる可変試料量試験⁷⁾の適用を試みた。

5.1 用いた試料と実験装置

注型・固化法によって作成した20mmφ×50mmの固体推進薬(約29g)を試料として用いた。起爆剤として

は20gのPETN粉末を薄いポリエチレンシートにくるみ、その中に6号雷管を挿入したものを用いた。これらをFig. 6に示すようにビニールテープで接着し、更にボール紙スペーサーで位置を固定できるようにした。また、臼砲孔の最深部は大きくなっており、試料がその中に落ち込んで結果に影響することをさけるた

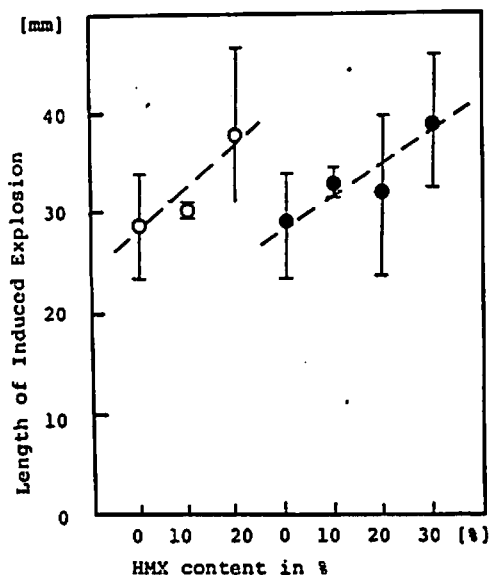


Fig. 8 Plots of length of induced decomposition vs. HMX content

めに、試料の下にボール紙を敷いた。

用いた弾道振子は日本油脂（株）武豊工場に設置されているものである。このものは実際の大砲を利用したもので、その外観及び諸元は Fig. 7 に示した。

5.2 実験手順

(1) (6号雷管+伝爆薬)の爆発威力試験

ポリエチレンシートにくるんだ20gのPETNと6号雷管を臼砲内に挿入し、紙筒にいれた1kgの砂の詰め物を詰めてから起爆して振子振れ幅を測定した。

(2) 可変試料量試験(伝爆性試験)

Fig. 6のように試料アセンブリと詰め物を臼砲内に装填し、臼砲を間隔が15mmとなるまで振子を近付け、発破器で雷管を起爆して、振子の振れ幅を測定した。火炎の有無も同時に観測した。起爆後、振子及び臼砲内に残った砂をふるいでふるって残薬の有無を確かめた。

5.3 結果と考察

実験結果を Table 4 に示す。

5.3.1 20g PETN の燃発による推進薬の誘発分解の起こる長さ

弾道振子を用いた実験では、25mm、50mm及び100mmの長さの推進薬を用いた。50mm及び100mmの長さの推進薬の起爆実験では必ず残薬が回収された。25mmの推進薬では未反応残薬は回収されなかった。

25mmの長さの推進薬の弾道振子実験の正味振れ幅が25mmの推進薬の完全な誘発分解の結果得られたものと仮定すると Table 5 に示す誘発分解の起こった長さが得られる。これを配合した HMX 含有量に対

してプロットしたものが Fig. 8 である。バラツキが大きいが、HMX 含量が大きくなると誘発分解の起こる長さも増大する傾向にある。本実験で用いた推進薬試料は直径20mmである。また、起爆に用いた伝爆薬は20gの粉状PETNである。上に得られた傾向が正しいかどうかは再現性のある形状の固体の伝爆薬を用い、より大きな直径の試料を用いる実験が必要である。しかし、この実験によって弾動臼砲による可変起爆剤試験の結果の一部は見かけのものであり、1.2gのPETN当量の起爆剤でもここで用いた推進薬は自己持続的な爆ごうは起こり得ないことを示している。

5.3.2 伝爆薬の影響

最初の実験では、20g PETNの伝爆薬を試料のとなりにおいて起爆した。そして、それ以後には同じ伝爆薬を試料に塩ビ粘着テープで固定して実験を行った。この結果の差異は Table 4 の50mm長さの試料について示されている。バラツキはあるが平均的には伝爆薬を固定した実験の方が振れ幅は大きくなっている。おそらく、伝爆薬を試料に固着することによってより強い衝撃波が試料中に投射され、より多くの誘発分解を起こしたものであろう。

6. まとめ

HMX入りコンボジット推進薬の衝撃感度及び伝爆性を評価する目的で弾動臼砲、弾道振子試験を行った結果、次のような知見を得た。

- ・推進薬の爆発威力が大きいため、MkⅢ弾動臼砲による評価は適当でない。
- ・従来型弾動臼砲による衝撃感度試験の結果、0~30%のHMXを含有した推進薬で感度の差はあまりなく、推進薬15gは0.28~0.48gのPETN当量の衝撃で大きな爆発威力を示した。この爆発的反応が自己持続性の爆ごうであるのか、起爆薬による誘発的なものかは明らかではない。
- ・弾道振子による伝爆性試験では、薬量を増やしても爆発威力が増加せず、残薬が発見されることから伝爆性は見られなかった。したがって、弾動臼砲で推進薬が示した爆発的反応が伝爆性を持たないことが分かった。しかし、この試験での試料形態は直径25mmと小さいため、もっと大きな直径では伝爆する可能性があり、さらに大規模の実験をする必要がある。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、文部省宇宙科学研究所より研究助成をいただいた。付記して感謝する。また、種々のご配慮をいただいた日本油脂（株）化学研究所の福田孝明、鈴木直久、山本飛雄氏その他の方々及び実験にご協力いただいた同加藤一成氏に感謝いたします。

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. (Intern.) on Combustions. The Combustion Institute (1981)
- 3) United Nations Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods, "Manual of Tests for the Hazardous Classification of Explosives" ST/SG/AG.10/C.1/12/Add.1, 1 October, 1984
- 4) 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)
- 5) a) 鈴木直久, 山本昭飛己, 加藤一成, 「HMX 含有コンボ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, 米田罔明, 浅羽哲朗, 「ニトラミンコンボ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 Nitamine", Proceedings of the 13th International Symposium on Space Technology and Science. 1982
- 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 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) 工業火薬協会編, 「工業火薬ハンドブック」, p. 376 (1966) 共立出版
- 9) 松永猛裕, 村永浩太郎, 蔵井 勇, 安部隆幸, 田村昌三, 吉田忠雄, 「MkⅢ弾動臼砲の性能と応用 (Ⅵ)」, 「MkⅢ弾動臼砲の特性」, 工業火薬, 46, 64 (1985)



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

—Evaluation by Ballistic Mortar and Ballistic Pendulum Tests—

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

A variable initiator test method has been applied to evaluate shock sensitivity of composite propellants containing HMX, using the Mk III ballistic mortar and conventional ballistic mortar. A variable sample weight test method also has been applied to evaluate ability to propagate explosion of these propellants, using the ballistic pendulum.

The variable initiator test by the Mk III ballistic mortar has not been applicable, because these propellants have so strong explosive power that the mortar is damaged. So we have tested these samples by using the conventional ballistic mortar. As the results, propellants containing 0-30 % HMX have almost same shock sensitivities by this method, and a 15 g propellant can propagate explosive decomposition by the shock of 0.28-0.48 PETN equivalence. The variable sample weight test by using the ballistic pendulum test has shown that these propellants can not propagate explosive self-sustaining detonation.

(* : Department of Reaction Chemistry, Faculty of Engineering, The University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

** : The Institute of Space and Astronautical Science, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153)